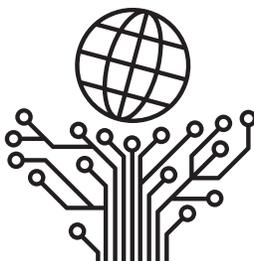


ОРГАНИЗАТОРЫ:
АО «НИИМЭ»
АО «НИИМА «Прогресс»

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:
Министерство промышленности и торговли Российской Федерации
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Группа компаний «Элемент»

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР:
Фонд перспективных исследований (ФПИ)
ООО «ХайТэк»



РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
10 ЛЕТ

РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
«МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2024»
10-я Научная конференция
«ЭКБ и микроэлектронные модули».
Сборник тезисов

Научно-технологический университет «Сириус»
23–28 сентября 2024 г.

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2024

УДК 621.3.01/.09
ББК 38.843
Р76

Р76 **Российский форум «Микроэлектроника 2024»**
10-я Научная конференция
«ЭКБ и микроэлектронные модули».
Сборник тезисов
Научно-технологический университет «Сириус»,
23-28 сентября 2024 г.
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 1526 с.

В выпуск включены тезисы докладов конференции, освещающие актуальные вопросы разработки, производства и применения электронной компонентной базы и электронных модулей.

УДК 621.3.01/.09
ББК 38.843

© АО «НИИМЭ», 2024
© АО «НИИМА «Прогресс», 2024
© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2024

Качество рисунков соответствует предоставленным авторами материалам.

Содержание

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	58
Перспективные методы исследования и оценки киберустойчивости доверенных ПАК для объектов КИИ <i>Зегжда Д. П.</i>	58
Развитие технологий СВЧ электроники в России <i>Борисов А. А.</i>	59
ТРЕК ОБЗОРНО-ДИСКУССИОННЫХ ЗАСЕДАНИЙ.....	62
Анализ информационной значимости результатов тестовых испытаний встроенного ПО в доверенных ПАК <i>Москвин Д. А., Оваспян Т. Д., Грибков Н. А.</i>	62
НАВИГАЦИОННО-СВЯЗНЫЕ СБИС И МОДУЛИ.....	63
Комплексирующая навигационная система услуг локации КОНСУЛ — подсистема локальной навигации <i>Корнеев И. Л., Александров А. В., Кузнецов А. С., Прасолов В. Ф.</i>	63
Тенденции развития элементной базы аппаратуры ЦОС космического назначения <i>Стешенко В. Б.</i>	68
На пути создания нового поколения миниатюрных квантовых стандартов частоты микроволнового и оптического диапазонов <i>Бражников Д. В., Михайлов А. М., Игнатович С. М., Месензова И. С., Вишняков В. И., Скворцов М. Н.</i>	69
Методы повышения помехоустойчивости локальных систем навигации в условиях воздействия оптимизированных помех <i>Глушанков Е. И., Кирик Д. И., Кондрашов З. К.</i>	71
Результаты разработки линейки навигационно-связных модулей и перспективы развития новых <i>Чикваркин И. Б., Потапов И. В.</i>	73
Вседиапазонный высокоточный навигационный антенный модуль <i>Медведев И. А., Бойко С. Н., Трухачев И. М.</i>	75
Интегральный СШП-СКИ трансивер <i>Маниленко И. Н., Каличкин С. В.</i>	80
Подходы к реализации OFDM модема с учетом особенностей системы связи 5G Advanced NTN применительно к высотным БЛА <i>Цуканова Е. Е., Лукьянчиков А. И., Сычев А. А., Клоков В. А., Каргин Н. И.</i>	82
Квантовые сенсоры и перспективная элементная база систем геопозиционирования и навигации нового поколения <i>Гусев С. В., Парёхин Д. А.</i>	85

Стратегия разработки и освоения в серийном производстве отечественных электронных компонентов для аппаратуры радиосвязи <i>Фефилов И. И.</i>	87
Архитектура сетевого микропроцессора в обеспечение задач синхронизации времени в различных применениях <i>Александров А. В.</i>	94
Навигация по подстилающей поверхности с использованием нейросетевых алгоритмов <i>Зинченко А.А.</i>	97
Отечественная СБИС для высокоточного позиционирования <i>Зимин А. Г., Яковлев В. В., Люсин С. В.</i>	98
Использование микропроцессорных ядер на основе архитектуры RISC-V для систем радиоподвижной связи <i>Игошин А. В., Лебедев А. В., Степанова А. С.</i>	100
Современные тренды развития систем транспортной телематики в условиях импортозамещения <i>Полторацкий В. Е.</i>	102
Реализация методов распознавания сигналов на СБИС K1879VM8Я с применением нейронных сетей <i>Ландышев С. В., Жолондковский В. В.</i>	104
Особенности проектирования быстродействующих радиационно стойких КМОП СФ-блоков нано-СБИС объемного кремния для бортовой аппаратуры <i>Герасимов Ю. М.</i>	106
Лазерные локационные системы на отечественной компонентной базе в системах интеллектуальной навигации беспилотного транспорта и роботов <i>Старовойтов Е. И.</i>	109
Разработка навигационной СнК нового поколения <i>Фатеев И. А.</i>	112
Анализ помехоустойчивости радионавигационных систем <i>Глушанков Е. И., Кирик Д. И., Горобцов И. А.</i>	114
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	116
Организация мульти-протокольной подсистемы высокоскоростных интерфейсов ввода-вывода в многопроцессорных системах <i>Белянин И. В.</i>	116
Архитектура сетевого контроллера RDMA RoCEv2 для дата-центров <i>Кiryushkin С. Б.</i>	119
Интеграция программных моделей производительности с верификационными стендами <i>Крюков П. И., Гаращенко А. В., Ладин О. И.</i>	121
Построение оптимизированной программной модели комплексных вычислительных систем <i>Ладин О. И.</i>	123

Выбор QEMU как среды для создания виртуальных прототипов устройств в рамках реализации модели разработки «Сдвиг влево» / «shift-left» <i>Ларионов А. А.</i>	125
Метод выбора параметров при синтезе системы управления РТК на основе многоверсионного моделирования <i>Суминов К. А.</i>	129
Методы и подходы создания высокопроизводительного параллельного потокового процессора для решения задач со сложноорганизованными данными <i>Бобков С. Г., Левченко Н. Н.</i>	131
Процессорные сложнотехнологические блоки с последовательным исполнением команд втоого поколения <i>Козлов А. В.</i>	133
Реализация проверки правил проектирования с применением гетерогенной вычислительной системы <i>Васюткин А. О., Смирнов Ю. В.</i>	134
Применение методов машинного обучения для ускорения достижения требуемого покрытия при функциональной верификации <i>Манеркин А. Д., Гревцев Н. А., Чибисов П. А.</i>	135
Анализ архитектурных решений для со-процессора РК1 <i>Сагитов А. В., Теленков В. В.</i>	137
Вычисления с применением операций на эллиптических кривых на основе ПЛИС <i>Турбин Д. С., Краснюк А. А.</i>	139
Проектирование слоев перераспределения для создания интерпозеров для высокопроизводительных систем <i>Лебедев Д. Д., Коршунов А. В., Гладышев А. С., Лачинов А. А.</i>	142
Требования к бортовой платформе ОТА транспортного средства как к ключевому элементу технологии V2X <i>Храмов С. О., Жариков А. М., Клоков В. А.</i>	144
Проектирование программно-аппаратных комплексов с применением ускорителей на базе GPU и ПЛИС <i>Тарасов И. Е.</i>	146
Накристалльная сеть процессоров «Эльбрус» седьмого поколения <i>Недбайло Ю. А.</i>	148
Кеш-память третьего уровня процессоров «Эльбрус» седьмого поколения <i>Сурченко А. В., Недбайло Ю. А.</i>	150
Перспективы использования микропроцессоров BE-S1000 в серверном оборудовании <i>Хренов Г. Ю., Кауркин М. Н., Гусев В. В.</i>	152

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	153
Символьная синхронизация при приеме сигналов в гидроакустических информационно-управляющих комплексах <i>Орлов А. В., Ракитин А. В.</i>	153
Исследование FMCW MIMO радара с медленной фазокодовой манипуляцией <i>Мелёшин Ю. М., Хасанов М. С., Карпов В. Н., Лялин К. С.</i>	155
Малогобаритная первичная MIMO радиолокационная станция ближней зоны действия <i>Иванов А. В., Сеницын Е. А.</i>	157
Моделирование влияния нелинейно-инерционных искажений в тракте основной частоты цифровых систем связи на целостность сигналов <i>Семенов Э. В.</i>	159
Генератор СВЧ-сигналов на основе элементов радиофотоники <i>Погорельский И. В., Цветков В. К.</i>	161
Формулировка технических требований и выбор конструктивных решений для модуля индуктивного питания имплантируемого нейростимулятора <i>Данилов А. А.</i>	163
Требования к электронной компонентной базе системы управления робототехническими комплексами <i>Мещеряков Р. В.</i>	164
Технология беспроводного питания множества устройств в масштабах помещения <i>Джандалиева А., Михайлов Н., Вдовенко А., Сиганов М., Майоров Е., Серегин П., Щелокова А., Белов П. А.</i>	166
Развитие аппаратного ускорения отечественных постквантовых алгоритмов для малоресурсных устройств и систем общего назначения <i>Данько А. М., Турченко О. Ю.</i>	169
Особенности автоматизации непрямого управления характеристиками инерционных живых объектов <i>Пожар К. В., Литинская Е. Л., Струкова Э. И., Чупраков Д. А.</i>	171
Сравнение методов динамической компенсации влияния смещений катушек на характеристики систем индуктивной передачи энергии к нейростимуляторам <i>Селютина Е. В.</i>	173
Перспективные методы антенных измерений для исследований и испытаний радиотехнических систем <i>Старовойтов Е. И., Руссанов В. И.</i>	175
Алгоритм обеспечения функциональных характеристик РЛС для работы в режиме сверхразрешения космических объектов <i>Перлов А. Ю.</i>	178
Применение аналого-информационного преобразователя в FMCW MIMO-радаре <i>Карпов В. Н., Мелёшин Ю. М., Лялин К. С.</i>	180

Система контроля характеристик комплекса пассивной безопасности транспортных средств <i>Веселовский Р. А., Саури А. Д., Клоков В. А., Сарайкин А. И.</i>	182
Метод измерения характеристик устройств основной полосы частот с выбросом на плоской вершине переходной характеристики <i>Полторыхин К. М., Семенов Э. В.</i>	186
Оптимизация систем индуктивного питания имплантируемой электроники с помощью алгоритма адаптивного поиска восхождением к вершине <i>Морозов А. В., Данилов А. А.</i>	189
Архитектура прототипа интегрального модуля управления диаграммой направленности сверхширокополосных антенных систем на базе элементов фотоники <i>Ушакова Е. В., Токмаков А. С., Батурин Г. А., Цветков В. К.</i>	191
Перспективы разработки и применения бортовых радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли для БПЛА <i>Цветков В. К., Кузьмин И. А., Лялин К. С.</i>	193
Сокращение задержки передачи данных через PCI-E с помощью стандарта CX1 <i>Солодовников А. П., Силантьев А. М., Переверзев А. Л.</i>	195
Метод повышения точности аналого-цифрового преобразования сигналов без потери быстродействия: теория и практическая реализация <i>Косенко В. А., Савченко Ю. В.</i>	197
Обработка импульсного сигнала фотоприемного устройства при помощи специализированной микросхемы <i>Казённов К. В., Якунин А. Н.</i>	199
Разработка драйвера гибридного шагового двигателя с микроконтроллерным управлением <i>Чельшев Л. С., Ануфриев А. Э., Тимошенков С. П.</i>	201
Архитектура системы мониторинга экологии водной среды <i>Тевяшов Г. К., Пашенко Р. А., Романова М. А.</i>	203
Оптимизация набора логических элементов для реализации систем функций в ПЛИС FPGA <i>Советов С. И.</i>	206
Современное состояние и перспективы развития изделий пьезотехники <i>Лазарев Д. В.</i>	208
ТЕХНОЛОГИИ И КОМПОНЕНТЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ	210
Конфигурирование технологической линии CVD для осаждения диэлектрических слоев в передовых КМОП-технологиях <i>Гулянов М. В., Патюков С. И.</i>	210
Альтернативные high-k и low-k-диэлектрики для приложений микроэлектроники <i>Резванов А. А., Зюзин С. С., Ганькина Е. А., Гвоздев В. А., Горохов С. А., Резник А. А., Цепкин М. В.</i>	212

Полностью самовыравнивающиеся переходные отверстия с применением метода зонально-селективного атомно-слоевого осаждения <i>Симонов А. В.</i>	214
Цифровая модель процесса ICP-CVD на молекулярном уровне: от активно обучаемых потенциалов к объяснению низкой воспроизводимости эксперимента <i>Гарифуллин К. З., Мезенцев И. А., Лосев Т. В., Баширов И. И., Салимов Р. Г., Кликушин А. С., Подрябинкин Е. В., Малышев В. И., Чалый В. А., Новиков И. С., Шапеев А. В., Медведев М. Г.</i>	216
Оценка влияния межоперационного времени простоя фоторезиста при выполнении операций проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете <i>Шелкунов Д. Ю.</i>	218
Оптимизация гетероструктур, изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs и InP диаметром до 150 мм: рНЕМТ, DrНЕМТ, НВТ и монолитно-интегрированные рНЕМТ/НВТ <i>Гладышев А. Г., Егоров А. Ю., Панасенко П. В., Дорофеев А. А.</i>	220
Исследование влияния чистоты химических реактивов раствора Каро для удаления органических соединений на примере рiп-диодных структур <i>Веретенников Д. А., Голубков С. А., Петушков В. Л., Григорьева Т. В.</i>	222
Влияние подлегирования поверхности на темновой ток утечки детекторов ионизирующего излучения <i>Веретенников Д. А., Голубков С. А., Петушков В. Л., Григорьева Т. В.</i>	224
Контроль ионных загрязнений на поверхности полупроводниковых пластин <i>Волоховский А. Д., Нелюбин И. В., Рудометов Я. А.</i>	226
Исследование эффекта сужения ширины линии фоторезистивной маски при измерениях методом растровой электронной микроскопии <i>Рудометов Я. А., Нелюбин И. В.</i>	229
Исследование и разработка метода совмещения фотомаски первого слоя металлизации в кремниевой технологии с проектными нормами 250 нм <i>Мищенко В. В.</i>	232
Низкотемпературное осаждение оксида алюминия методом атомно-слоевого осаждения <i>Кузьмичёв Д. С.</i>	234
Проблематика и особенности ускоренного метода оценки надежности МОП-транзисторов на воздействие горячих носителей заряда <i>Воеводин А. В., Селецкий А. В., Мясников С. Ю.</i>	235
Исследование ВАХ элементов хранения энергонезависимой памяти SONOS в зависимости от площади <i>Червоный Д. В., Арилин Р. А., Скоморохов Д. В., Захаров П. С.</i>	237
Корреляция ресурса переключений и токов утечки сегнетоэлектрических элементов хранения на основе $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ <i>Константинов В. С., Захаров П. С.</i>	238

Влияние параметров импульсов записи/стирания на пороговое напряжение и долговечность EEPROM памяти <i>Сорокин Д. В., Морозов Е. Н., Шелепин Н. А.</i>	241
Методы оптимизации конструкции n-канальных LDD МОП-транзисторов для подавления эффекта горячих носителей заряда <i>Лалин А. Е., Псху Д. А.</i>	243
Как изменялся маршрут КМОП СБИС при переходе от 130 нм к техпроцессам менее 90 нм: технологические вызовы и пути их решения <i>Носаева К. С.</i>	245
Перспективные технологические решения в области высокотемпературной пайки и нанесения функциональных покрытий при изготовлении металлокерамических корпусов <i>Ахметгалиев Р. Ш., Шугаев Ш. Н., Ермолаев Е. В., Егояшин В. А., Сачков В. И., Медведев Р. О.</i>	247
Проблематика CoS и CoWoS корпусирования и методы их решения технологией Flip-Chip <i>Савушкин Г. А.</i>	249
Высокоточное утонение пластин с использованием стеклянного носителя со сверхнизким TTV и технологии временного монтажа <i>Суханов Д. А.</i>	252
Кремниевые структуры со сквозными термомиграционными каналами <i>Середин Б. М., Скиданов А. А., Попов В. П., Малибашев А. В., Степченко А. Д., Гаврус И. В., Царева Е. А.</i>	256
Компоненты молекулярной электроники <i>Роженко И. Н., Федичкин Н. В.</i>	258
Основные тенденции развития мировой микроэлектроники — 2024 <i>Шелепин Н. А.</i>	260
Предварительный расчет и оценка влияния LER-эффекта при формировании ИС <i>Кульчинов М. С., Калёнов А. Д., Лосев В. В.</i>	262
Определение геометрических параметров кластеров ксенона, образованных при имплантации монокристаллического кремния низкоэнергетичными ионами ксенона <i>Киреев Г. С., Подорожний О. В., Румянцев А. В., Миннебаев Д. К., Иешкин А. Е., Богданова Н. А., Боргардт Н. И.</i>	264
Исследования структуры гетероперехода GaAs-SnAs-Sn <i>Бобылев М. А., Ковалев В. И., Каевицер Е. В., Любченко В. Е.</i>	266
Особенности конструкции и технологии производства кристаллов для кремниевой силовой ЭКБ <i>Романов Д. А., Кравчук Е. А., Чернышев Ю. П., Быкова А. В., Машевич П. Р.</i>	268
Конструктивно-технологические особенности высоковольтных Trench IGBT-транзисторов <i>Быкова А. В., Крицкая Т. Б., Машевич П. Р.</i>	270

Современные возможности толсто пленочной технологии <i>Адарчин С. А., Мишенев Р. А., Гурин В. М.</i>	272
Необходимость, возможности и способы преодоления хронической болезни российской микроэлектроники: низкого выхода годных, проблем надежности и улучшения характеристик изготавливаемых приборов <i>Ковешников С. В., Солтанович О. А., Мордкович Е. А.</i>	273
Методики практического определения составляющих дозовой ошибки в проекционной фотолитографии <i>Балан Н. Н., Васин А. А., Иванов В. В., Панкратов А. Л.</i>	275
Возможности повышения разрешающей способности стандартных процессов проекционной фотолитографии за счет фотошаблонов <i>Балан Н. Н., Иванов В. В., Панкратов А. Л.</i>	277
Разработка мультипроектных пластин <i>Лукошко Г. К., Нартов С. И., Шашкова И. В., Чамова А. В.</i>	279
Управление структурой HZO и функциональными свойствами сегнетоэлектрических ячеек памяти на его основе путем легирования и модификации границ раздела <i>Черникова А. Г., Забросаев И. В., Сизых Н. А., Ислам К., Маркеев А. М.</i>	281
Технология глубокого направленного плазмохимического травления кремния в смешанном режиме <i>Осипов А. А., Фумина А. Е., Шешилова А. Б., Ендиярова Е. В., Александров С. Е.</i>	284
Непроволочные пиротехнические воспламенители с эффектом СВС для развертывания автомобильных подушек безопасности <i>Корж И. А., Чулкин В. А.</i>	287
Исследование формирования двухслойного теплораспределительного элемента конструкции на основе композиционного материала алмаз — карбид кремния — кремний <i>Никитина М. Ю., Куликов Е. Н., Федоров Ю. Ю.</i>	291
Приборно-технологическое моделирование приборов силовой электроники в диапазоне рабочих напряжений от 1200 до 6500 В <i>Кравчук Е. А., Полохова Ж. В., Романов Д. А., Быкова А. В., Машевич П. Р.</i>	293
Особенности конструкции и технологии производства кристаллов силовых полевых транзисторов <i>Полохов А. М., Власов В. А., Быкова А. В., Ашанин М. Е., Шилов К. А., Машевич П. Р.</i>	295
Корректировка электрических, динамических параметров и тепловых потерь силовых транзисторов и диодов методом радиационно-термической обработки <i>Врнев Я. А., Кравчук Е. А., Чернышев Ю. П., Власов В. А., Машевич П. Р.</i>	297
ДОВЕРЕННЫЕ ПАК И ЭКБ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОЙ ГРАЖДАНСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	298
Общий подход к моделированию одиночных эффектов от нейтронов, протонов и ионов в цифровых КМОП-схемах <i>Забрев Г. И., Родин А. С., Матейко А. А.</i>	298

Методическое обеспечение испытаний электронных компонентов к воздействию импульсных электрических перегрузок <i>Шемонаев А. Н., Епифанцев К. А., Кессаринский Л. Н.</i>	300
Новые аналоговые микросхемы <i>Адамов Д. Ю., Дюканов П. А., Зотов Л. А., Семихатов И. А.</i>	301
Управление силовыми транзисторами в высокоэффективных импульсных преобразователях <i>Новиков П. А.</i>	303
Проективные методы повышения точности АЦП <i>Цыбульский О. А.</i>	305
Проб-карта для исследования сложнофункциональных СВЧ приемопередающих СБИС на пластине <i>Амбуркин К. М., Землеруб А. К., Усачев Н. А.</i>	308
«Визуальное» проектирование монолитной интегральной схемы маломощного усилителя Ки-диапазона на основе отечественной 0,5 мкм GaAs pHEMT-технологии <i>Черкашин М. В., Коколов А. А., Бабак Л. И.</i>	310
Экспериментальное исследование кремниевого трансимпедансного усилителя ДС — 2,5 ГГц на основе 180 нм КМОП-технологии <i>Коряковцев А. С., Коколов А. А., Бабак Л. И.</i>	312
Разработка интегральной микросхемы маломощного усилителя на нитриде галлия <i>Желаннов А. В., Казанцева З. С., Калинин Б. В., Хеглунд И. Л.</i>	314
Российский 32-битный микропроцессор <i>Ян С. И.</i>	316
Комплект аналоговых базовых матричных кристаллов как платформа быстрой разработки импортозамещающих аналоговых микросхем <i>Попов А. Э., Прокопенко Н. Н., Пахомов И. В., Кузнецов Д. В., Дворников О. В.</i>	318
Среда непрерывной интеграции для обеспечения процессов проектирования доверенных СФ-блоков и СБИС <i>Аряшев С. И., Власов С. Е., Гревцев Н. А., Чибисов П. А.</i>	320
Разработка и производство пассивных компонентов для критической гражданской инфраструктуры: задачи, перспективы и необходимая государственная поддержка <i>Верник П. А.</i>	322
Научно-технические особенности подходов к освоению и производству гражданской электронной компонентной базы <i>Плис Н. И., Фролова И. Н., Белоусова Н. Н., Малиновский Р. В.</i>	325
Инфраструктура доверия. Как обеспечивается безопасное доверенное взаимодействие всех компонентов инфраструктуры. <i>Груздев С. Л.</i>	327
Использование технологии РК1 в цепочке поставки доверенных ПАК <i>Дьяков О. Н.</i>	329

Оценка эффективности тестовых испытаний встроенного ПО <i>Москвин Д. А., Овасапян Т. Д., Грибков Н. А.</i>	330
Интеллектуальный анализ физических характеристик функционирования ПАК <i>Москвин Д. А., Югай П. Э.</i>	331
Практика исследования доверенности ПАК с помощью техники направленного фаззинга <i>Иванов Д. В., Писков А. А.</i>	333
Исследование распознаваемости утечки по боковым каналам различных операций в процессе криптографической обработки информации <i>Тишин А. С., Алексеев В. Д., Михайлов В. Ю.</i>	334
Метод диагностирования изменений в топологии интегральных микросхем: оценка радиационной стойкости и обеспечение доверенности <i>Кульченков Е. А., Жаровин А. Н., Демидов А. А., Рыбалка С. Б.</i>	337
Этап функциональной верификации систем на кристалле на примере микроконтроллера для аналоговых систем <i>Степанов И. А.</i>	339
Исследование радиационной стойкости линейного стабилизатора напряжения положительной полярности с выходным напряжением 5 В <i>Кульченков Е. А., Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Дербунов И. В.</i>	340
Потенциал технологии безопасных вычислений Эльбрус при создании ПАК для КИИ <i>Мухин А. А.</i>	342
Обзор проекта ПНСТ «Критическая информационная инфраструктура. Доверенные интегральные микросхемы. Типовые факторы нарушения доверенности» <i>Сидорин Ю. Ю.</i>	343
СМК организаций как основа обеспечения доверенного жизненного цикла ЭКБ (на примере СМК АО «НИИМЭ») <i>Панасюк В. Н., Кравцов А. С., Королева А. Н., Шипицин Д. С., Панкратов А. Л.</i>	345
Комплект ЭКБ для устройств АСУ ТП и РЗА цифровых подстанций <i>Бумагин А. В., Шмаков Е. В.</i>	348
СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И СИСТЕМ	350
Обеспечение качества комплектов средств проектирования посредством автоматизации и проникновением в процесс разработки на ранних этапах <i>Гриценко О. В., Антонов Д. С.</i>	350
Процедура схемного симулятора для определения многих периодических решений при моделировании мемристорных схем <i>Русаков С. Г., Ульянов С. Л.</i>	352

Проблематика и методы реализации проверки логической эквивалентности в системах автоматизированного проектирования систем на кристалле <i>Мальшев Н. М.</i>	354
Генерация тестовых параметризованных ячеек интерактивными методами для ускорения процесса верификации PDK 90 нм и ниже <i>Тюрин А. В., Кириллов М. А., Надин А. С., Шипицин Д. С., Загидулина О. Р.</i>	356
Методология поиска и проверки критических узлов в блоках памяти <i>Ширяев А. В.</i>	358
Миграция топологии IP под управлением электрической схемы <i>Калашников В. С., Розенфельд В. П., Керре А. Л., Смирнов Ю. Г., Сотников М. А., Семенов М. Ю.</i>	359
Маршрут проектирования СВЧ интегральных схем на основе программного обеспечения с открытым исходным кодом <i>Шеерман Ф. И., Ковалев В. В., Хайрулин Д. Е., Помазанов А. В.</i>	361
Методы синтеза топологии СВЧ монолитных интегральных схем <i>Сальников А. С., Билевич Д. В., Степанов В. И., Попов А. А., Калентьев А. А.</i>	364
САПР для реализации сквозного маршрута проектирования современных типов корпусов, трехмерных микросборок, многокристалльных модулей и систем в корпусе, включая применение технологии проводного монтажа <i>Федоткин А. С.</i>	366
Разработка САПР аналоговых и СВЧ-схем, планы и задачи <i>Иванова Е. Н.</i>	368
Методика оценки локальной температуры мощных компонентов на кристалле с использованием тепловой FEM модели подложки <i>Али А. З.</i>	370
Исследование и анализ характеристик стандартных цифровых элементов в диапазоне криогенных температур на примере технологии КМОП 180 нм <i>Ильин С. А., Капустин А. В., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., Шипицин Д. С.</i>	372
Исследование температурных характеристик МОП-транзисторов отечественной технологии 180 нм при криогенных температурах <i>Шипицин Д. С., Власов И. А., Ласточкин О. В., Матвеев Н. Н., Осыкин А. А., Потупчик А. Г.</i>	375
Исследование базовых конструкторско-технологических решений для разработки радиационно стойких библиотек стандартных цифровых элементов в базе технологии КМОП 90 нм на основе RHVD методологии <i>Ильин С. А., Ласточкин О. В., Копейкин Д. Ю., Новиков А. А., Шипицин Д. С.</i>	378
Проектирование аппаратного ускорителя моделирования RTL <i>Лукьянченко Г. А., Монахов А. М., Уманский М. В., Елизаров С. Г.</i>	381
Ускорение процесса характеризации библиотек с использованием встроенного программного интерфейса SPICE-симулятора <i>Сорокин Т. М., Макаров Г. Н., Калашников В. С., Семёнов М. Ю., Макаров С. В., Дубровин С. А.</i>	383

Проблема недетектируемых обрывов в схемах памяти и способы ее решения на этапе проектирования <i>Новосельцева И. В., Туленко Е. А., Савин С. А., Цырлов Ю. М.</i>	385
Расширенная SPICE-модель МОП-транзистора для моделирования при криогенных температурах <i>Осыкин А. А., Нуштаев А. В., Потупчик А. Г.</i>	387
Повышение эффективности аналогового проектирования ИС за счет внедрения схемотехнических PCell <i>Надин А. С., Кириллов М. А., Шипицин Д. С.</i>	389
Разработка электронной компонентной базы на основе математической модели магниторезистивного преобразователя для применения в гражданских системах управления и контроля в робототехнике, автоэлектронике и авиации <i>Полевиков В. В., Юров А. С., Чеплаков А. А., Литвиненко Э. О.</i>	391
ПК «Сервис» — реализация модуля внешнего заказчика с учетом требований информационной безопасности <i>Медведев К. А., Панкратов А. Л., Иванов В. В., Капкин И. Д., Костюк М. Д., Рябинин А. Д.</i>	393
СВЧ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И МОДУЛИ	396
Применение LTCC-технологии для создания пассивных компонентов и плат СВЧ модулей <i>Галдецкий А. В., Щербаков С. В.</i>	396
Примеры МИС СВЧ, разработанных с использованием различных подходов и инструментов проектирования — полет технической мысли или борьба с ограничениями <i>Кондратенко А. В., Шишкин Д. А., Сорвачев П. С.</i>	399
Приемо-передающий модуль X-диапазона на основе Si и GaN СВЧ ЭКБ <i>Баранов Г. В., Болгов С. Ю., Кривошеев А. В., Матвеев В. С., Панасенко П. В.</i>	401
Приемо-передающий модуль СВЧ-диапазона частот на отечественной ЭКБ <i>Карасев М. С., Шеголев С. А., Далингер А. Г., Шацкий С. В., Адиатулин А. В.</i>	402
Разработка приемо-передающего модуля миллиметрового диапазона длин волн на основе монолитной интегральной схемы <i>Макарецв И. В., Беляков В. А., Дюков Д. И., Власов В. В., Воробьев А. К.</i>	403
Отечественный широкополосный генератор сигналов произвольной формы с открытым исходным кодом <i>Елизаров С. Г., Монахов А. М., Галдин И. В., Иванов Д. М., Дюкова А. С., Боннет Я. В., Чернухин В. В., Кузьмич М. А., Белкин М. А., Гончаров С. В., Спиридонов Р. В.</i>	406
Разработка активных RFID-датчиков для контроля изоляторов воздушных линий электропередач <i>Хвостов Ю. М., Зубков В. И., Данилов В. А.</i>	409

Параметрический умножитель частоты с низким уровнем вносимого фазового шума <i>Баринов Д. А., Гурьянов Н. О.</i>	411
Проектирование устойчивых к возбуждению монолитных СВЧ-усилителей на основе корректирующих цепей амплитудно-частотной характеристики <i>Дудинов К. В., Заднепрная Н. И.</i>	413
Исследование влияния элементов конструкции на паразитное электромагнитное излучение малогабаритных СВЧ модулей <i>Болгов С. Ю., Волосов А. В., Кривошеев А. В., Матвеев В. С., Панасенко П. В., Россов А. С.</i>	417
Преобразователь последовательного кода в параллельный для применения в многофункциональных GaAs СВЧ МИС <i>Иванов А. В., Кондратенко А. В., Сорвачев П. С., Щербаков А. С.</i>	420
Синтез СВЧ интегральных ступенчатых аттенюаторов и фазовращателей в интеллектуальной САПР «Смекалец» <i>Горяинов А. Е., Добуш И. М., Калентьев А. А., Сальников А. С., Файль Т. Н., Юлаев А. А., Метель Ю. А., Набережнев Н. А., Швоев В. С., Кабанова Е. В., Метель А. А.</i>	422
От идеи разработки нового типа ферритового циркулятора к организации производства СВЧ электроники <i>Семенов Д. А., Сквородников С. В.</i>	424
Особенности оптимизации параметров МИС СВЧ управляемых полосовых фильтров при моделировании <i>Дрозденко Е. С., Суворов А. И.</i>	426
На пути к построению моделей отечественных GaN НЕМТ-транзисторов для САПР СВЧ-устройств <i>Попов А. А., Добуш И. М., Сальников А. С., Дудинов К. В., Емельянов А. М., Зыков Д. Д., Подвигалкина Н. О., Зыков В. Д.</i>	427
Комплект СФ-блоков S-диапазона на основе отечественной 180 нм КМОП-технологии <i>Кокотов А. А., Ходжиков Д. В., Шутов Е. С., Коряковцев А. С., Помазанов А. В., Шеерман Ф. И., Бабак Л. И.</i>	429
Технологический процесс GaN на кремнии с топологической нормой 0,25 мкм в НИЦ «Курчатовский институт» <i>Занавескин М. Л.</i>	431
Экспериментальные исследования параметров нормально-закрытого СВЧ GaN полевого транзистора <i>Лосев В. В., Хлыбов А. И., Родионов Д. В., Котляров Е. Ю., Егоркин В. И., Чаплыги Ю. А.</i>	432
Исследование влияния фазовых шумов в смесителе, на основе математической модели <i>Богомолов Е. С., Медведев Д. А.</i>	434

Внедрение частичной автоматической системы сборки в технологический процесс производства прямо-передающих СВЧ-модулей <i>Коротяев Н. А., Быковский Г. В., Карасев М. С., Тутьнин Д. В.</i>	436
Технологии проектирования и производства корпусов, работающих в СВЧ-диапазоне <i>Шугаев Ш. Н., Егошин В. А., Ахметгалиев Р. Ш.</i>	437
Перспективы применения материалов LTCC в устройствах силовой электроники <i>Косевской В. А., Кваша М. Ю., Ештокина А. И.</i>	439
Обзор технических решений, используемых в конструкции мощных ВЧ и СВЧ фиксированных аттенуаторов <i>Малышев И. Н., Белков И. Г., Еремеев Ю. В.</i>	441
MIMO радиочастотная GaN/GaAs микросборка прямо-передающего устройства активного антенного модуля высотной платформы для сетей 5G advanced NTN <i>Саури А. Д., Клоков В. А., Сарайкин А. И., Каргин Н. И.</i>	443
Применение композитных материалов в СВЧ приложениях на примере антенн для систем 5G и 6G <i>Ерзунов П. Н.</i>	446
Применение синергетических подходов в методах проектирования мощных AlGaN/GaN HEMT с заданными приборными характеристиками <i>Торхов Н. А., Шутов Д. Г., Колковский Ю. В., Жабина Е. Ю.</i>	448
Апробация аспектов технологических операций формирования омических контактов к подложкам монокристаллического алмаза <i>Иванова Н. Е., Щаврук Н. В., Галиев Р. Р., Гнатюк Д. Л.</i>	450
Проектирование и оптимизация многокристального силового GaN микромодуля <i>Доценко В. В.</i>	451
Разработка тепловых прецизионных преобразователей мощности СВЧ-диапазона <i>Матвеев А. И., Чирков И. П.</i>	452
Результаты натурной отработки моделирования схемотехники твердотельного ПППМ РСА методом пространственно-временной обработки сигнала в сквозном канале <i>Каевицер Е. В., Каргашин Ю. Д., Лемперт П. И., Лычагин А. Ю.</i>	454
Оптический смеситель СВЧ-диапазона на основе низкотемпературного GaAs <i>Дудкин П. В., Криштоп В. Г., Соболев А. С., Андреев С. Н., Пономарев Д. С., Лаврухин Д. В., Галиев Р. Р., Ячменев А. Э.</i>	456
Влияние морфологии поверхности на осцилляции некоторых электрических параметров гетероструктур на основе AlGaN/GaN <i>Шутов Д. Г., Колковский Ю. В., Торхов Н. А., Жабина Е. Ю.</i>	457

Физические основы повышения воспроизводимости базовых технологических процессов промышленного производства GaN ЭКБ высокого уровня сложности <i>Торхов Н. А., Колковский Ю. В., Шутов Д. Г.</i>	459
Разработка структурно-параметрических электрических схем замещения дросселей, конденсаторов и проводов для проектирования высокочастотных фильтров радиопомех на отечественной элементной базе для авиационно-космических радиоэлектронных систем <i>Дмитриков В. Ф., Вялов А. А., Исаев В. М., Куневич А. В., Шушпанов Д. В.</i>	461
Применение СВЧ-устройств большой и сверхбольшой мощности. Объемы рынка. Стратегические направления развития <i>Парамонов Ю. Н.</i>	463
МИКРОСИСТЕМЫ. СЕНСОРЫ И АКТЮАТОРЫ	464
Разработка и исследование инерциальных приборов и микросистем с использованием МЭМС <i>Тимошенков С. П.</i>	464
Разработка МЭМС-акселерометра для измерения линейного ускорения при сильных механических ударах <i>Ткаченко А. В., Лысенко И. Е., Платонов Д. Д., Юркин Н. О., Фролова А. О.</i>	465
Конструктивно-технологические аспекты изготовления МЭМС-акселерометра емкостного типа <i>Фролова А. О., Платонов Д. Д., Юркин Н. О., Ткаченко А. В., Лысенко И. Е.</i>	466
Разработка инерциальных микросистем на базе емкостных встречно-штыревых структур <i>Соловьев А. А., Баклыков Д. А., Стукалова В. Е., Пильник И. С., Курочкина Ю. А., Родионов И. А.</i>	467
Исследование влияния технологических процессов на величину остаточных напряжений в упругих подвесах кольцевого вибрационного МЭМС-гироскопа <i>Юркин Н. О., Платонов Д. Д., Ткаченко А. В., Фролова А. О., Лысенко И. Е.</i>	469
Исследование экспериментальных МЭМС-акселерометров с ЧЭ планарного типа <i>Анчутин С. А., Кочурина Е. С., Дернов И. С., Галкин А. А., Тимошенков А. С.</i>	470
Технологические аспекты изготовления микромеханического датчика удара <i>Кочурина Е. С., Виноградов А. И., Калугин В. В., Зарянкин Н. М., Боев Л. Р., Тимошенков А. С., Салогуб М. В.</i>	471
Разработка микромеханического акселерометра с тремя осями чувствительности с диапазонами регистрации ускорений $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ и $\pm 16g$ <i>Лысенко И. Е., Ткаченко А. В., Платонов Д. Д., Юркин Н. О., Фролова А. О.</i>	472
Программно-аппаратный комплекс автоматических измерений микроэлектромеханических (МЭМС) изделий <i>Чельшев Л. С., Тимошенков С. П.</i>	473

Разработка и исследование ИКЧНС на базе МЭМС <i>Соломкина Н. А., Захаров В. П., Галкин А. А., Салогуб М. В., Мельник К. К., Тимошенков А. С.</i>	474
Разработка и исследование МЭМС-датчика курса для мобильного робота-погрузчика <i>Галкин А. А., Анчутин С. А., Кочурина Е. С., Михеев А. В., Соломкина Н. А., Тимошенков А. С., Тимошенков С. П.</i>	482
Измерительный комплекс для определения расстояния и азимута источника возбуждения поверхностных сейсмических волн на основе молекулярно-электронных сенсоров <i>Зайцев Д. Л., Гордеев Я. А., Горчаков И. В.</i>	484
Системное моделирование как методология проектирования Н/МЭМС <i>Лукин А. В., Попов И. А., Штукин Л. В., Пискун Н. В., Удалов П. П.</i>	487
Разработка МЭМС-сенсоров на основе тонких мембран для определения параметров газовых сред <i>Дюжев Н. А., Орешкин Г. И., Денисов В. Е., Парамонов В. В., Чиненков М. Ю.</i>	489
Применение струйной микропечати для формирования чувствительных элементов полупроводниковых газовых сенсоров на основе оксидов металлов <i>Сагитова А. С., Николаева А. В., Поломошнов С. А., Амеличев В. В., Кривецкий В. В.</i>	490
Разработка технологии создания и исследование сорбционных свойств микрофлюидных газохроматографических колонок на кремниевых подложках <i>Платонов И. А., Платонов В. И., Агафонов А. Н., Андреев Т. А., Миланина К. И., Дюжев Н. А., Лазаренко И. П., Чиченков М. Ю., Парамонов В. В.</i>	492
МЭМС-переключатели для передовых систем радиолокации и связи <i>Уваров И. В.</i>	493
Фотометрическая матрица на основе фотозарядного эффекта <i>Курчанов А. Ф., Харламов П. Г.</i>	495
Дискретизация изображения малоразмерных объектов матричным микроболометрическим детектором <i>Хафизов Р. З., Серов В. В., Скрипачева Л. В., Соколов К. В.</i>	497
Технология производства многоуровневых микросистем с торцевой коммутацией на основе органических подложек и бескорпусных микросхем <i>Вертянов Д. В., Беляков И. А., Жумагали Р. Н., Соловьев И. А., Сидоренко В. Н.</i>	499
Микросхемы АЦП и ЦАП производства АО «Ангстрем» и перспективы новых разработок <i>Трудновская Е. А., Горюнов С. В., Гамарц И. А., Сладков М. В.</i>	502
Исследование и оптимизация технологии формирования микронагревателя газового сенсора на основе платины <i>Николаева А. В., Поломошнов С. А., Амеличев В. В., Кривецкий В. В., Григорьев Д. М.</i>	504
Идентификация жидких веществ схожего химического состава с применением метода машинного обучения <i>Воронова Н. В., Шамин Е. С., Тельминов О. А., Горнев Е. С., Анисимкин В. И.</i>	507

Технология формирования резистивной маски с высоким аспектным соотношением	
<i>Платонов Д. Д., Юркин Н. О., Ткаченко А. В., Лысенко И. Е., Фролова А. О.</i>	509
Разработка технологии обработки стекла для создания устройств микросистемной техники	
<i>Баклыков Д. А., Стукалова В. Е., Соловьев А. А., Курочкина Ю. А., Пильник И. С., Родионов И. А.</i>	510
Промышленное применение атомно-силовой микроскопии в производстве ПАВ-фильтров	
<i>Литун Я. Б., Синицына Т. В., Груздев А. С.</i>	512
Плазмохимический синтез тонких пленок IGZO	
<i>Телегин С. В., Сафронова С. С., Славовская Е. А., Мочалов Л. А.</i>	515
Разработка микроэлектронных сенсоров на основе магниторезистивных тонкопленочных структур	
<i>Дюжнев Н. А., Орешкин Г. И., Парамонов В. В., Чиненков М. Ю., Демин Г. Д.</i>	517
Технологии проектирования и производства корпусов для микросборок и инерционных МЭМС-датчиков	
<i>Нагаев Н. А.</i>	518
Накопительные детекторы ионизирующего излучения	
<i>Федоренко В. В., Яшин В. С.</i>	520
Исследование влияния геометрических параметров подвижной структуры на процесс плазмохимического травления инерциальных МЭМС	
<i>Каранин Н. С.</i>	522
Применение лазерной и плазмохимической обработки поверхности полиимида для повышения адгезии металла к диэлектрику в слоях перераспределения	
<i>Кочергин М. Д., Соловьев И. А., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П.</i>	523
Исследование влияния внутренних тепловых и внешних факторов на взаимную точность установки сенсорных устройств на борту космического аппарата в целях обеспечения необходимой общей полосы захвата с гарантированным перекрытием	
<i>Разживалов П. Н., Лавренов В. А.</i>	525
Тепловое моделирование электронного блока рамочной конструкции, выполненного на основе аддитивных технологических процессов	
<i>Волков С. В., Кобзева А. С., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П.</i>	527
Анализ S-параметров в микросборке с торцевой коммутацией с использованием дву- и трехмерных сред моделирования	
<i>Вертянов Д. В., Евстафьев С. С., Батин С. А.</i>	529
Компьютерное моделирование пьезоактуаторов и подвижных зеркал кольцевых резонаторов лазерных гироскопов	
<i>Синельников А. О., Тихменев Н. В., Ушанов А. А., Назаров С. И.</i>	531
Эффективность планарных и сетчатых электрохимических преобразователей	
<i>Горина Е. В., Дудкин П. В., Криштон В. Г.</i>	533

Газовый сенсор на основе легированных азотом углеродных нанотрубок <i>Рудык Н. Н., Ильин О. И., Чефранов А. А., Тихолоз А. А., Яковенко М. С.</i>	535
Высокоточные миниатюрные датчики линейных ускорений для перспективных систем безопасности <i>Жукова С. А.</i>	537
Оценка влияния технологических погрешностей при изготовлении чувствительных элементов твердотельных волновых гироскопов на их ожидаемые характеристики <i>Жукова С. А., Котельников А. С., Обижаев Д. Ю., Фролов Е. Н.</i>	539
Метод формирования функциональных алюминиевых проводников с заданным сопротивлением для микромеханических чувствительных элементов датчиков угловых скоростей <i>Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю.</i>	541
СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	543
Текущее состояние, проблемы и перспективы импортозамещения ключевых узлов специального технологического оборудования <i>Алексеев А. Н., Баранов Д. А., Виноградов А. Ю., Литвинов Н. А., Новиков С. А., Петров С. И.</i>	543
Развитие продуктовой линейки и создание опытного производства отечественного кластерного оборудования для микроэлектроники <i>Шуренкова С. А., Афонин П. Е., Костюков Д. А., Шубников А. В.</i>	544
Разработка эпитаксиального и планарного оборудования для материалов A^3B^5 — переход от R&D к производственно-ориентированному уровню <i>Алексеев А. Н., Гердт А. Д., Петров С. И., Литвинов М. А.</i>	546
Разработка отечественного оборудования ионной имплантации для полупроводникового производства <i>Авдиенко А. А., Аверьянов Е. В., Азаров А. А., Бирюков М. Г., Кузьмич К. В., Одинокоев В. В., Павлов Г. Я., Старостенко А. А., Третьяков Е. В., Чуркин И. Н., Шпаков А. Н.</i>	548
Статус работ по Инжектору для ТМ-200Т <i>Старостенко А. А., Авдиенко А. А., Вахрушев Р. В., Девятайкина Т. А., Докутович В. А., Драничников А. Н., Константинов С. Г., Краснов А. А., Кремнев Н. С., Лопаткин И. А., Орешонок В. В., Рыбцкая Т. В., Рябченко К. К., Семенов Е. П., Сеньков Д. В., Склярков В. Ф., Сорокин А. В., Штешов А. Г., Субаев Е. А., Усов П. В., Цыганов А. С., Чуркин И. Н., Шиянков С. В.</i>	550
Конструктивные особенности специального технологического оборудования для производства КМОП СБИС с технологическими нормами 45 нм и менее <i>Смирнов А. А.</i>	551
Разработка и производство физико-термического оборудования для получения материалов и структур ЭКБ <i>Бородин А. В., Бородин В. А., Веретенников А. В., Францев Д. Н., Юдин М. В.</i>	553

Исследования однородности температуры подложки в установке вакуумно-плазменного травления <i>Горностаев П. А.</i>	555
Термическое оборудование для микроэлектроники, оптики, и фотоники <i>Челаккин Д. Г., Корячко В. В., Трактирщев В. С., Стройкин А. Е., Черкунов В. И.</i>	557
Проблемы и перспективы производства технологического оборудования для предприятий микроэлектронной промышленности России <i>Фролов Г. Ю.</i>	558
Разработка установки электронно-лучевой литографии <i>Лебедева Н. И.</i>	559
Двухэтапная фотоэлектронная литография для работы с хрупкими наноструктурами <i>Мартанов С. Г., Таркаева Е. В., Иевлева В. А., Кунцевич А. Ю.</i>	561
Особенности СТО для процессов жидкостной химической очистки и травления в передовых технологиях 45 нм и менее <i>Шерметова М. А.</i>	563
Плазменное травление в передовых КМОП-технологиях: эволюция оборудования <i>Борисов В. Ю.</i>	565
Модернизация вакуумных установок магнетронного и терморезистивного напыления <i>Крылов М. Л.</i>	567
Прецизионная подача жидких реагентов в технологическое оборудование на основе регулятора расхода жидкости <i>Сажнев С. В., Князев В. И.</i>	570
Технология изготовления контрольно-измерительной оснастки в рамках импортозамещения <i>Зубарев Р. В., Шугаев Ш. Н., Егшин В. А., Ахметгалиев Р. Ш.</i>	574
Опыт ООО «Совтест АТЕ» в области разработки стендов для проведения электротермотренировки ЭКБ. Модельный ряд стендов <i>Мальшев Р. А.</i>	575
Прецизионные измерения фазовых шумов в задачах радиолокации и связи. Решение, разработанное в России <i>Румянцев К. В.</i>	577
Отечественное лазерное технологическое оборудование <i>Чехановский Д. С.</i>	579
Оборудование для контактной фотолитографии АВМ Pacific Inc <i>Богословский В. А.</i>	581
Установки химического осаждения из газовой фазы <i>Якухина А. В.</i>	584
Столик технологический с приводами наклона и поворота для установки ионной имплантации <i>Азаров А. А., Тимошенков С. П.</i>	587

Обязка специального технологического оборудования в условиях запускаемого производства <i>Ерохин С. А.</i>	589
Метрологическое обеспечение системы для испытаний бесконтактных интерфейсов в соответствии с ГОСТ 14443 <i>Шмигельский В. В., Лебедев А. В.</i>	591
Проект национального стандарта ГОСТ Р «Системы подготовки воды для производства электронной техники. Требования к получению, хранению и распределению ультрачистой воды» <i>Смирнов В. Б., Сафонова Д. В., Якименко С. И.</i>	593
Система автоматической оптической инспекции печатных плат <i>Каширин Н. В., Ходотаева Т. С., Аверина А. И., Гурьянов А. Е., Русинов Г. А.</i>	599
Оборудование АО «НПП»ЭСТО» для оптики, фотоники и микроэлектронной промышленности <i>Корячко В. В., Трактирщиков В. С., Стройкин А. Е., Черкунов В. И.</i>	601
Лабораторный оптический литограф на основе технологии цифровой обработки света <i>Галиуллин А. А., Мартанов С. Г., Кунцевич А. Ю.</i>	602
Использование критерия нормальности Бореля и теоремы Байеса для исследования и описания случайности <i>Лысенко Е. В.</i>	604
Сравнение производительности электронных литографов с гауссовским и профилированным пучком <i>Казьмирук В. В., Курганов И. Г.</i>	607
НЕЙРОМОРФНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ	609
Электронные модули и аппаратные средства распределенной системы управления роботами сейсморазведки <i>Ронжин А. Л., Савельев А. И., Крестовников К. Д., Ерашов А. А.</i>	609
Электронные модули управления позиционированием и захватом воздушной манипуляционной системы при операциях с сейсмодатчиком <i>Крестовников К. Д., Ронжин А. Л.</i>	611
Классификация голосовых команд импульсной нейронной сетью, исполняемая с учетом ограничений нейроморфного процессора на разрядность синаптических весов <i>Рыбка Р. Б., Серенко А. В., Сбоев А. Г., Дёмин В. А.</i>	614
Текущее состояние и перспективы освоения технологии энергонезависимой резистивной памяти RRAM в России <i>Михайлов А. Н.</i>	616
Оптоэлектронная мемристорная нейронная сеть на основе низкоразмерных кристаллов для детектирования, запоминания и распознавания изображения <i>Панин Г. Н., Капитанова О. О.</i>	618



Особенности аппаратной реализации режимов обучения в нейроморфных архитектурах на мультибитных мемристивных элементах <i>Андреева Н. В., Дудкин А. П., Маврин И. А., Рындин Е. А.</i>	620
Программная среда для моделирования элементов энергонезависимой памяти <i>Абгарян К. К.</i>	622
Многоуровневые мемристоры в матричном кроссбар-исполнении на базе структур оксид-нанокompозит для нейроморфных приложений <i>Рыльков В. В., Ильясов А. И., Емельянов А. В., Мацукатова А. Н., Ичеткин Д. В., Суражеский И. А., Черноглазов К. Ю., Ситников А. В., Занавескин М. Л., Демин В. А.</i>	624
Новые мемристивные структуры М/НК/Д/М <i>Ситников А. В., Калинин Ю. Е., Бабкина И. В., Никонов А. Е., Шакуров А. Р., Демин В. А., Емельянов А. В., Рыльков В. В.</i>	626
Быстродействие и точность компактных схмотехнических моделей мемристора на гладких и табличных функциях <i>Удовиченко С. Ю., Бусыгин А. Н., Ибрагим А. Х. А., Писарев А. Д., Шулаев Н. А.</i>	627
Теоретическое и экспериментальное исследование процессов многофиламентарного переключения элементов энергонезависимой резистивной памяти, необходимых для создания нейроморфных систем <i>Ковешников С. В., Ванькаев А. С., Ключкина Е. В., Федотов М. И.</i>	630
Особенности аппаратной реализации искусственных нейронных сетей на базе мемристивных устройств <i>Щаников С. А.</i>	632
Перспективы применения легированных азотом углеродных нанотрубок в нейроморфных системах <i>Ильина М. В., Соболева О. И., Ильин О. И.</i>	634
Нанокompозитные мемристоры парилен-МоО ₃ для эффективной квантизации весов в нейроморфных системах <i>Емельянов А. В., Трофимов А. Д., Мацукатова А. Н., Несмелов А. А., Демин В. А.</i>	636
Мемристоры на основе антисегнетоэлектрических туннельных переходов <i>Ханас А. Р., Сизых Н. А., Жидков Н. С., Зенкевич А. В.</i>	638
Дробно-дифференциальный пороговый интегратор с утечкой и его нейроморфная реализация <i>Сибтов Р. Т., Гаврилова А. К., Савицкий А. И.</i>	639
Биполярные морфологические нейронные сети для нейроморфных вычислителей <i>Николаев Д. П., Ямаев А. В., Лимонова Е. Е.</i>	641
Машинное обучение с аппроксимацией решений на основе дифференциально алгебраических уравнений <i>Горбцов А. С.</i>	643

Автоматизированное проектирование нейроморфной архитектуры на базе аппаратно-функциональных блоков <i>Петров М. О., Рындин Е. А., Андреева Н. В.</i>	645
Энергоэффективный и масштабируемый маршрутизатор нейронных импульсов <i>Писарев А. Д., Бусыгин А. Н., Удовиченко С. Ю.</i>	650
Применение моделей детекции и сегментации для решения задач материаловедения <i>Вербицкий Р. А., Ананьев М. В., Сыров Ю. В., Латонов В. Д., Денисова Д. В., Никифорова В. В., Паламарчук Я. В., Лебедев А. С., Куличенко А. Д.</i>	653
Применение нейросетевых технологий в задачах навигации <i>Скиба Е. С., Старовойтов Е. И.</i>	657
Инференс нейронных сетей на тензорном процессоре NIM <i>Осипенко Г. П.</i>	660
Разработка двухдиапазонной умной камеры на российском процессоре СКИФ <i>Салмин С. А., Колодный С. А.</i>	661
Физические основы сверхпроводниковой био-подобной нейроэлектроники <i>Щеголев А. Е.</i>	663
Применение элементов искусственного интеллекта в ИК-спектроскопии для биомедицинских приложений <i>Голяк И. С., Анфимов Д. Р., Фуфурин И. Л., Морозов А. Н.</i>	665
Детекция боли на основе данных со стимулятора спинного мозга <i>Рябкин Д. И., Герасименко А. Ю.</i>	667
Нейросетевой алгоритм и его возможная аппаратная реализация для полетного контроллера БПЛА <i>Тельминов О. А.</i>	669
Условия применимости формализма К-систем и нейросетей к имитационному моделированию процессов и приборов наноэлектроники <i>Матюшкин И. В., Тельминов О. А.</i>	670
Низкий разброс мемристивных характеристик нанокompозитных структур $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ с прослойкой LiNbO_3 <i>Ильясов А. И., Емельянов А. В., Черноглазов К. Ю., Ситников А. В., Рьльков В. В., Форш П. А., Демин В. А.</i>	672
Визуализация и исследование эволюции проводящих филаментов в резистивно-переключаемых структурах $\text{Pt}/\text{TaO}_x/\text{Ta}$ методом EBIC <i>Коростылёв Е. В., Жук М. Ю., Черникова А. Г., Савельева Е. О., Мутаев И. А., Коробкин Е. Н.</i>	674
Мемристивные свойства МДП-структур на основе сегнетоэлектрического оксида гафния на кремнии <i>Савичев И. А., Марголин И. Г., Чуприк А. А.</i>	677
Эффект резистивного переключения в конденсаторных и кроссбар-структурах на основе поли-п-ксилилена <i>Швецов Б. С., Емельянов А. В.</i>	679



Применение нейронных сетей в операциях контроля микро- и наноструктур <i>Францезин Д. В., Панфилова Е. В., Ибрагимов А. Р., Кошелева М. А.</i>	682
Объектно-процессное моделирование нейроморфных систем <i>Дорофеев В. П.</i>	684
Гетерогенная вычислительная система для задач локального искусственного интеллекта <i>Кателкин Н. И., Бабинцев Л. В., Баулин Ф. А., Ильянова Д. С., Рожин А. К., Минеев А. В., Нефедов С. И., Соловьев Д. В.</i>	686
Нейроэлектронные интерфейсы для улучшения моторных функций в спорте и реабилитации <i>Гордлеева С. Ю.</i>	688
КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — КВАНТОВЫЕ КОММУНИКАЦИИ	689
Прототип программно-аппаратного комплекса для защищенных мобильных коммуникаций с использованием технологии квантового распределения ключей <i>Чухнов И. А., Зайцев Д. Л., Криштон В. Г., Кузнецов А. С., Буканов Е. А., Молчанов М. А., Поздняков А. М., Павлов И. Д., Андреев С. Н.</i>	689
Особенности создания программно-аппаратного комплекса защищенной передачи данных в мобильных сетях стандартов 4G/5G с применением технологий квантового распределения ключей <i>Маврин Е. М.</i>	691
Эпитаксиальные слои GaP на сапфире с малыми оптическими потерями для фотонных интегральных схем <i>Мухин И. С., Федоров В. В.</i>	692
Фотонные интегральные схемы. Кремниевая фотоника и материалы A^3B^5 <i>Криштон В. Г.</i>	695
Применение фотонных интегральных схем в квантовой коммуникации на боковых частотах <i>Киселёв Ф. Д., Самсонов Э. О., Чистяков В. В., Казаков И. А., Шипулин А. В., Дорожкин П. С., Егоров В. И.</i>	697
Определение секретного ключа в квантовой коммуникации с учетом побочных каналов <i>Сыч Д. В.</i>	698
Об управлении взаимодействующими с окружением кубитами и о стойкости протоколов КРК в условиях затухания <i>Печень А. Н.</i>	700
Лавинные фотодиоды для однофотонных детекторов спектральной области 1,55 мкм <i>Воропаев К. О., Воропаева И. О., Варфаламеева С. В., Блохин С. А., Новиков И. И., Андрюшкин В. В., Устинов В. М., Карачинский Л. Я.</i>	702

Фотоэлектронные умножители для детектирования группированных фотонов <i>Попов В. Г.</i>	705
Физические датчики случайных чисел. Особенности квантовых генераторов случайных чисел <i>Науменко А. П.</i>	707
Текущий опыт и перспективы практического развития технологии квантового распределения ключей <i>Алексеев А. Л.</i>	709
Разработка стационарной системы формирования защищенных каналов связи между бортовыми устройствами, расположенными на подвижном составе, и системами управления железнодорожным транспортом <i>Галдин А. А., Андрианов В. Б.</i>	710
Принципы сопряжения сетей квантового распределения ключей, построенных на оборудовании разных производителей <i>Александров С. В., Герасимова А. Г., Емельянов В. М., Мареева Е. В.</i>	712
Вопросы информационной безопасности квантово-криптографических систем выработки и распределения ключей <i>Зызыкин А. П., Дворецкий Д. А., Науменко А. П.</i>	714
Оптическая квантовая память, основанная на использовании приготовленной долгоживущей спиновой когерентности <i>Моисеев С. А., Герасимов К. И., Миннегалиев М. М., Моисеев Е. С.</i>	716
Модели квантовых мемристоров на захваченных ионах Yb^+ <i>Стремоухов С. Ю., Форш П. А., Хабарова К. Ю., Колачевский Н. Н.</i>	717
Атомный интерферометр на холодных атомах рубидия <i>Осипенко Г. В., Алейников М. С., Пашкова Ю.</i>	719
Атомный чип для задач квантовой сенсорики <i>Афанасьев А. Е., Быкова Д. В., Балькин В. И.</i>	720
Физические принципы миниатюрных высокочувствительных магнитных сенсоров на основе светоиндуцированного дихроизма в парах щелочных металлов <i>Бражников Д. В., Макаров А. О., Козлова К. С., Вишняков В. И., Гончаров А. Н.</i>	722
Квантовый алгоритм опорных векторов для классификации квантовых состояний <i>Киктенко Е. О., Семёнов С. Д.</i>	724
Серийная технология изготовления джозефсоновских интегральных схем <i>Москалев Д. О., Соловьева А. А., Смирнов Н. С., Москалева Д. А., Зикий Е. В., Коршаков Н. Д., Кривко Е. А., Телеганов М. И., Андросчук М. В., Никеров Г. Д., Агафонова Ю. А. и Родионов И. А.</i>	726
Протоколы двухкубитных квантовых операций на основе сверхпроводниковой электроники <i>Бастракова М. В., Вожяков В. А., Линева А. В., Куландин Д. А., Клёнов Н. В., Соловев И. И.</i>	728



Описание эволюции логических состояний при изменениях в логическом базисе	
<i>Антипов А. В.</i>	730
Магنونные интерконнекты для кубитов различных типов	
<i>Темная О. С., Каткова А. С.</i>	731
Атомный квантовый компьютер: сборка массивов холодных атомов	
<i>Уянгулов К. А., Стручалин Г. И., Бобров И. Б., Страупе С. С.</i>	733
Нечеткие измерения и смягчение ошибок на основе принципов полноты, адекватности и точности в оптических квантовых информационных технологиях	
<i>Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Лукичев В. Ф.</i>	735
Атомный квантовый компьютер: разложение однокубитных операций и детектирование атомов	
<i>Стручалин Г. И., Воробьев А. Е., Михайлова В. И., Бобров И. Б., Страупе С. С.</i>	737
Решение уравнения теплопроводности на сверхпроводниковом квантовом сопроцессоре Snowdrop 4Q	
<i>Смирнов Н. С., Матанин А. Р., Москалев Д. О., Иванов А. И., Москалева Д. А., Соловьева А. А., Полозов В. И., Житков Н. М., Ечеистов В. В., Коробенко И. С., Малеванная Е. И., Зикий Е. В., Кривко Е. А., Коршаков Н. Д., Телеганов М. И., Гетманов Б. К., Андрощук М. В., Никеров Г. Д., Агафонова Ю. А., Баклыков Д. А., Жуков А. А., Бабухин Д. В., Белов В. В., Лебедев А. В., Погосов В. В., Родионов И. А.</i>	739
Метод аппроксимации статистических распределений с тяжелыми хвостами и его применение в задачах квантовых информационных технологий	
<i>Богданова Н. А., Богданов Ю. И., Лукичев В. Ф.</i>	741
Ослабление ошибок приготовления, преобразования и измерения двухкубитового состояния в процедуре томографии гейта Мёльмера—Соренсена	
<i>Дмитриев И. А., Богданов Ю. И., Бантыш Б. И., Кокшаров К. Б., Лукичев В. Ф.</i>	743
Прецизионная реконструкция поляризационных квантовых состояний в условиях зашумленных измерений	
<i>Голышев И. К., Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Лукичев В. Ф.</i>	745
Методы измерения квантовых систем гарантированной точности	
<i>Кузнецов Ю. А., Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Лукичев В. Ф.</i>	747
Разработка оптимальных протоколов измерений ионных кудитов	
<i>Кокшаров К. Б., Богданов Ю. И., Бантыш Б. И., Лукичев В. Ф.</i>	749
Измерительные решения для исследований и разработки в области квантовых технологий	
<i>Бараковский Ф. А., Маслов П. В.</i>	751
Формирование одиночных азот-вакансионных центров окраски в CVD-алмазе методом облучения высокоэнергетичными электронами	
<i>Калошин М. М., Вергелес С. С., ФА. С., Маргушин Р. Е., Салказанов А. Т., Каргин Н. И., Кукин Н. С., Бухтияров А. А.</i>	753

Объединение гейтов и увеличение размерности фреймов: сравнение двух подходов минимизации негативности квантовых цепочек <i>Куликов Д. А., Яшин В. И., Федоров А. К., Киктенко Е. О.</i>	755
Модуль считывания на базе параметрического криоусилителя с согласованием импеданса <i>Москалева Д. А., Смирнов Н. С., Москалев Д. О., Матанин А. Р., Иванов А. И., Баклыков Д. А., Телеганов М. И., Полозов В. И., Кугук А. К., Малеванная Е. И., Ечеистов В. В., Коробенко И. С., Родионов И. А.</i>	757
Организация многопользовательских квантовых сетей с промежуточными доверенными узлами <i>Сантьев А. А., Яшин Д. А., Рогов Р. И., Дубинский А. Р., Борodin В. С., Новоторжин А. В., Алексеев А. Л.</i>	759
Реализация базовых алгоритмов квантовых вычислений на ионной платформе <i>Колачевский Н. Н.</i>	761
ОПТО- И ФОТОЭЛЕКТРОНИКА	762
Современное состояние и направления развития фото- и оптоэлектроники инфракрасного диапазона в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» <i>Бурлаков И. Д., Старцев В. В.</i>	762
Перспективы создания высокотемпературных ИК детекторов на основе материалов A^3B^5 содержащих сурьму <i>Кривобок В. С., Пашкеев Д. А., Клековкин А. В., Минаев И. И., Ерошенко Г. Н., Савин К. А., Муратов А. В., Гончаров А. Е., Николаев С. Н.</i>	764
Конструктивно-технологические аспекты проектирования матричного микроболлометрического детектора с шагом элементов 12 мкм <i>Шилейко Н. А., Москвичев В. Ю., Соколов К. В., Хафизов Р. З.</i>	765
Технология прецизионного прессования линз. Состояние и перспективы освоения в России <i>Полесский А. В., Семенченко Н. А., Сайкина Т. С., Старцев В. В., Семенча А. В., Архипова Л. Н., Щербаков К. В.</i>	766
Полупроводниковые лазеры для опто- и микроэлектронных приложений <i>Пихтин Н. А.</i>	768
Полупроводниковые лазеры и фотоприемники спектрального диапазона 1300–2000 нм <i>Ладугин М. А., Иванов А. В., Лобинцов А. В., Сапожников С. М., Мармалюк А. А., Кузнецов Е. В.</i>	770
Перспективные OLED микродисплеи с интегрированными блоками и настраиваемыми алгоритмами обработки изображения <i>Забабурин А. Ю., Морозов А. А., Нуриев А. В., Стахарный С. А., Шипицин Д. С.</i>	771
Фотосенсоры на основе коллоидных квантовых точек для видимого и коротковолнового ИК-диапазона <i>Попов В. С., Пономаренко В. П., Попов С. В.</i>	773

Обработка в АО «ОКБ «Астрон» технологии корпусирования перспективных крупноформатных матричных микроболометрических приемников ИК-излучения <i>Бетров С. Б., Ерастов Д. А., Иванов С. Ю., Копцев Д. А., Москвичев В. Ю., Попов В. К., Сильницкая О. А., Соколов К. В., Солодков А. А., Худаяров З. Ф., Шилейко Н. А., Юняев Р. Р.</i>	775
Кремниевые фотодиоды и лавинные фотодиоды для литографических установок на длинах волн 11,2 и 13,5 нм <i>Забродский В. В., Аруев П. Н., Николаев А. В., Шерстнёв Е. В.</i>	777
Структурные и оптические свойства барьерно-диодных гетероструктур на основе In(As)Sb. <i>Клековкин А. В., Кривобок В. С., Пашкеев Д. А., Минаев И. И., Савин К. А., Ерошенко Г. Н., Мартовицкий В. П., Аминев Д. Ф., Николаев С. Н.</i>	778
Печатные фотодетекторы для матричных ФПУ для X-Ray датчиков <i>Санджиева М. А., Алешин Д. К., Даниловский Э. Ю., Куприянова К. И., Каргапольцев С. В., Новоселов П. А.</i>	780
Инфракрасная радиометрия на основе многорядных инфракрасных фотоприемных устройств для дистанционного зондирования Земли <i>Болтарь Константин Олегович, Бурлаков И. Д., Гектин Ю. М., Головин С. В., Старцев В. В., Давлетишин Р. В.</i>	781
Мощные квантово-каскадные лазеры для спектрального диапазона 8 мкм <i>Дуделев В. В., Черотченко Е. Д., Врубель И. И., Михайлов Д. А., Чистяков Д. В., Мылников В. Ю., Лосев С. Н., Когновитская Е. А., Лютетский А. В., Слипченко С. О., Гладышев А. Г., Подгаецкий К. А., Бабичев А. В., Папылев Д. С., Андреев А. Ю., Яроцкая И. В., Ладугин М. А., Мармалюк А. А., Новиков И. И., Кучинский В. И., Карачинский Л. Я., Пихтин Н. А., Егоров А. Ю., Соколовский Г. С.</i>	783
Технология изготовления неохлаждаемой микроболометрической ИК-матрицы с шагом элементов 17 мкм <i>Юркин Н. О., Платонов Д. Д., Ткаченко А. В., Фролова А. О., Лысенко И. Е.</i>	785
Двумерные материалы как основа для фотодетекторов <i>Кунцевич А. Ю.</i>	786
Материал HgCdTe для матричных фотоприемных устройств ИК-диапазона 8–14 мкм: современное состояние и перспективы развития в РФ <i>Трофимов А. А., Денисов И. А., Андрусев Ю. Б., Гришечкин М. Б., Моисеев А. Н., Чилиясов А. В., Евстигнеев В. С., Коновалов А. А., Шматов Н. И., Косякова А. М., Гладышева К. А., Малыгин В. А.</i>	787
Исследование крупноформатного ИК ФПУ на основе цифровых фотомодулей для сканирующей аппаратуры <i>Бурлаков В. И., Гапонов О. В., Морковников Н. И.</i>	789
Технология формирования матрицы светофильтров на тонкопленочном герметизирующем покрытии OLED структуры <i>Костышина Л. А., Морозов А. А., Нуриев А. В., Симаков А. С., Стахарный С. А.</i>	791

Результаты разработки передовых БИС считывания с цифровым выходом <i>Ларионов Н. А., Кузнецов П. А., Якимов Ю. А., Кузнецов А. Н.</i>	793
Особенности синтеза высокочистого поликристаллического арсенида галлия для оптоэлектроники <i>Мочалов Л. А., Телегин С. В., Корнев Р. А., Слаповская Е. А.</i>	795
Обоснование возможности создания оптико-электронных систем технического зрения робототехнических комплексов воздушного, наземного и подводного назначения для применения в условиях естественных и организованных оптических помех. <i>Грузевич Ю. К., Гордиенко Ю. Н., Альков П. С., Чистов О. В.</i>	797
Создание аппаратуры регистрации изображений с дополненной реальностью в виде спектральных эффектов, полученных принципиально новым способом в кадровом формате <i>Агринский М. В., Откупман Д. Г., Старцев В. В.</i>	802
Матричные SWIR фотоприемники на основе меза-планарных InGaAs XBn-гетероструктур <i>Иродов Н. А., Болтарь К. О., Седнев М. В., Трухачев А. В., Лопухин А. А.</i>	804
Разработка системы кремниевых волноводов как элемента стандартной библиотеки проектирования <i>Шишкин А. В., Габидуллин А. Р., Желтиков В. А., Тюлькова А. А., Орликовский Н. А., Архипов С. В., Сороковых Д. Е., Аббасов Т., Лихачев Б. В., Гаврилов К. А., Денисов А. А.</i>	806
Разработка кремниевого интегрального интерферометрического делителя как элемента стандартной библиотеки проектирования <i>Желтиков В. А., Сороковых Д. Е., Орликовский Н. А., Габидуллин А. Р., Архипов С. В., Аббасов Т., Шишкин А. В., Тюлькова А. А., Лихачев Б. В., Гаврилов К. А., Денисов А. А.</i>	808
Датчик изображений по технологии КМОП BSI для медицинских приложений <i>Супонников Д. А., Спицын В. Ю.</i>	810
ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОТОНИКА, ВОЛОКОННЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	812
Интегральная фотоника от видимого до среднего ИК-диапазона: технологии и приложения <i>Родионов И. А.</i>	812
Центр Сколтеха по прототипированию устройств интегральной фотоники: результаты и перспективы на 2024–2030 гг <i>Денисов А. А.</i>	814
Дизайн, производство и применение фотонных интегральных схем в системах коммуникации и сенсорики <i>Казakov И. А., Галкин М. Л., Малахов К. М., Киселёв Ф. Д., Самсонов Э. О., Чистяков В. В., Дорожкин П. С., Егоров В. И., Певчих К. Э., Шипулин А. В.</i>	816

Интегрируемые оптически активные элементы для фотонных интегральных схем	
<i>Криштон В. Г.</i>	818
Сверхширокополосные интегрально-оптические модуляторы на основе ниобата лития: современное состояние и перспективы развития	
<i>Парфенов М. В., Варламов А. В., Ильичев И. В., Усикова А. А., Тронева А. В., Агрузов П. М., Шамрай А. В.</i>	820
Принципы построения и создание компактных и эффективных источников сверхкоротких лазерных импульсов на основе полупроводниковых гетероструктур	
<i>Слипченко С. О., Шушканов И. В., Подоскин А. А., Багаев Т. А., Мармалюк А. А., Ладугин М. А., Пихтин Н. А.</i>	822
Высококогерентный одночастотный лазерный источник на основе активных и пассивных фотонных интегральных схем	
<i>Артемов Д. Е., Кондаков А. А., Фомиряков Э. А., Наний О. Е., Трещиков В. Н., Федосеев А. И.</i>	824
Поликристаллические пленки ниобата лития: обзор и перспективы применения в интегральной фотонике	
<i>Перин А. С., Кузнецов И. В.</i>	826
Разработка пассивных, перестраиваемых и активных элементов фотонных интегральных схем на основе кремния	
<i>Орликовский Н. А., Габидуллин А. Р., Желтиков В. А., Сороковых Д. Е., Архипов С. В., Аббасов Т., Шишкин А. В., Тюлькова А. А., Лихачев Б. В., Гаврилов К. А., Денисов А. А.</i>	828
Технологическая платформа для прототипирования устройств кремниевой фотоники	
<i>Габидуллин А. Р., Желтиков В. А., Шишкин А. В., Тюлькова А. А., Орликовский Н. А., Архипов С. В., Сороковых Д. Е., Аббасов Т., Лихачев Б. В., Гаврилов К. А., Денисов А. А.</i>	830
Особенности технологий корпусирования управляемых фотонных интегральных схем на основе кремния	
<i>Архипов С. В., Орликовский Н. А., Габидуллин А. Р., Желтиков В. А., Сороковых Д. Е., Аббасов Т., Шишкин А. В., Тюлькова А. А., Денисов А. А.</i>	832
Неразрушающий контроль элементной базы фотоники методами спектральной интерферометрии	
<i>Забалуева З. А., Кулик Д. Д., Парра Орельяна Ф. А., Завалишина Л. Д., Маркварт А. А., Ушаков Н. А.</i>	834
Особенности контроля спектральных параметров фотонных интегральных схем при серийном производстве	
<i>Левин Д. Д., Васенов М. О., Стебельков А. Н.</i>	836

Твердотельные сканирующие системы для лидаров на основе фотонных интегральных схем	
<i>Бузаверов К. А., Бабурин А. С., Сергеев Е. В., Авдеев С. С., Лотков Е. С., Букатин С. В., Степанов И. А., Крамаренко А. Б., Амирасланов А. Ш., Евсеева А. Р., Шмонина О. И., Рыжиков И. А., Родионов И. А.</i>	838
Электрооптическая модуляция для фотонных матричных процессоров	
<i>Бабурин А. С., Бузаверов К. А., Сергеев Е. В., Авдеев С. С., Лотков Е. С., Букатин С. В., Степанов И. А., Крамаренко А. Б., Амирасланов А. Ш., Евсеева А., Шмонина О. И., Рыжиков И. А., Родионов И. А.</i>	840
Разработка узла ввода-вывода излучения для приборов интегральной фотоники на основе InP гетероструктур	
<i>Васильевский И. С., Бурдыкин М. С., Рыжук Р. В., Виниченко А. Н., Тертышина Ю. А., Гришаков К. С., Касьянов В. С., Каргин Н. И., Стриханов М. Н.</i>	842
Инновационный спектрометр на чипе	
<i>Яньков В. В., Ивонин И. А., Певчих К. Э., Любичкая А. В.</i>	845
Разработка программного обеспечения для схемотехнического проектирования фотонных интегральных схем и устройств оптоэлектроники	
<i>Киселёв Ф. Д., Беляков В. И., Тупяков Д. В., Егоров В. И., Самсонов Э. О.</i>	847
Структурные и оптические свойства сверхрешеток 2 типа InAs/GaSb	
<i>Ерошенко Г. Н., Кривобок В. С., Пашкеев Д. А., Клековкин А. В., Минаев И. И., Савин К. А., Муратов А. В., Гончаров А. Е., Николаев С. Н.</i>	849
Высокоскоростное устройство измерения дальности	
<i>Беляев К. С., Гук А. С., Тышкунов Н. В.</i>	851
Перспективные разработки микрооптических гироскопов	
<i>Кнышев С. Р.</i>	856
Беспроводная хроническая стимуляция периферических нервов с помощью органического оптоэлектронного имплантата	
<i>Марков А. Г., Юсуповская Е. А., Коновалов А. Н., Пьявченко Г. А., Тельшев Д. В.</i>	858
Оптимизация и расчет молекул для органической электроники	
<i>Дроздов Ф. В.</i>	860
МАТЕРИАЛЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ	861
Разработка фоторезистов для фотолитографии с актиничным излучением 248 нм	
<i>Кузнецова Н. А., Малков Г. В., Курбатов В. Г., Пугачева Т. А., Малимоненко Н. В., Варламов Д. А., Бадаמיшина Э. Р.</i>	861
Анализ состава и разработка антиотражающих покрытий с рабочей длиной волны 248 нм	
<i>Курбатов В. Г., Кузнецова Н. А., Малков Г. В., Пугачева Т. А., Орган В. М., Малимоненко Н. В., Варламов Д. А., Бадаמיшина Э. Р.</i>	863



Производство материалов для отечественных фоторезистов с химическим усилением: фотогенераторы кислоты и метакрилаты каркасных алициклов <i>Заморецков Д. С., Кузнецов И. Е., Кузнецова Н. А., Сидельцев М. Е., Новиков А. С., Лолаева А. В., Аккуратов А. В.</i>	865
Разработка электронных резистов на основе сополимеров метилметакрилата и метакриловой кислоты <i>Бороздина А. А., Курбатов В. Г., Малков Г. В.</i>	867
Модель и моделирование эволюции шероховатости резиста вследствие неоднородности экспонирования и проявления <i>Зайцев С. И., Свинцов А. А.</i>	869
Методы определения основных характеристик резистов для электронно-лучевой литографии <i>Князев М. А., Иржак Д. В.</i>	871
Особенности процесса химического усиления в фоторезистах, чувствительных к излучению 248 нм <i>Кузнецова Н. А., Минаков Г. С., Уваров А. В., Малков Г. В., Курбатов В. Г., Аккуратов А. В., Пугачёва Т. А., Березин Е. Н.</i>	872
Разработка материалов для корпусирования высокопроизводительных микросхем в многвыводные полимерные корпуса <i>Пахомов К. С., Казаков С. И., Малков Г. В., Курбатов В. Г., Пугачёва Т. А., Вертянов Д. В., Прудскова Т. Н., Бадамшина Э. Р.</i>	874
Современные методы диагностики материалов и устройств микро- и нанoeлектроники <i>Роцушкин Д. В., Фахртдинов Р. Р., Емелин Е. В., Иржак Д. В., Пундииков К. С.</i>	876
Рентгеновская томография как метод дефектоскопии: о проблеме сильнопоглощающих включений <i>Гильманов М. И., Николаев Д. П., Арлазаров В. В., Чукалина М. В.</i>	878
Методы загрузки паров щелочных металлов в газовые кюветы <i>Щаврук Н. В., Думчиков К. А., Гусев С. В.</i>	880
Комбинированные сканирующие микроскопы с механическим и оптическим поточечным зондированием электронных схем на микро- и наномасштабе для измерения их локальных топографических, механических и электрических характеристик и поиска скрытых структурных дефектов <i>Козодаев Д. А., Трусов М. А., Дроботов Д. Д.</i>	882
Разработка набора широкополосных СВЧ зондов для измерения параметров микроэлектронных устройств на пластине <i>Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Михайлов П. Д., Раков А. В., Семёнов В. А.</i>	884
Метрологическое обеспечение измерений S-параметров микроэлектронных структур на пластине <i>Беспалова Д. А., Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Раков А. В., Семёнов В. А.</i>	887

Электрохимическая емкость пористого кремния с углеродным покрытием <i>Коротыцкая-Седловец Д. М., Ульянова В. В., Старков В. В.</i>	890
Исследование влияния типа и концентрации поверхностно-активных веществ на электропроводность углеродных нанотрубок <i>Едельбекова П. А., Сорокин Д. В., Волкова Л. С., Анканов А. А., Шаман Ю. П., Герасименко А. Ю.</i>	892
Применение легированных азотом УНТ при создании чувствительных элементов преобразователей механической энергии <i>Ильин О. И., Рудык Н. Н., Поливянова М. Р., Хомленко Д. Н., Ильина М. В.</i>	894
III-нитридные НЕМТ гетероструктуры с ультратонким барьером AlN: исследование транспортных свойств и экспериментальное применение <i>Гусев А. С., Рыжук Р. В., Султанов А. О., Неволдина Т. Н., Сафаралиев Г. К., Каргин Н. И.</i>	896
Методы изменения диэлектрической проницаемости в пленках $Hf_xZr_{1-x}O_2$ для применения в конденсаторах ячеек DRAM <i>Хакимов Р. Р., Черникова А. Г., Маркеев А. М.</i>	898
Синтез и свойства двумерных дихалькогенидов переходных металлов, получаемых химическим осаждением из газовой фазы и сульфидизацией ALD оксидов Mo/W <i>Забросаев И. В., Козодаев М. Г., Романов Р. И., Черникова А. Г., Маркеев А. М.</i>	900
О применимости принципа Гиббса — Кюри — Вульфа при расчетах анизотропии поверхностной энергии кристаллов <i>Бокарев В. П., Красников Г. Я., академик РАН</i>	902
Закономерности формирования канальной неоднородности в монокристаллах InSb (Te), выращенных в кристаллографических направлениях [111], [110], [100], [112] <i>Журавлев Е. О., Козлов Р. Ю., Белов А. Г., Молодцова Е. В., Комаровский Н. Ю., Князев С. Н., Нестюркин М. С.</i>	904
Магнитоэлектрический эффект в структурах с аморфным магнитным сплавом и пьезоэлектрическим монокристаллом <i>Джапаридзе М. В., Фетисов Л. Ю., Фетисов Ю. К., Савельев Д. В., Федулов Ф. А., Мусатов В. И., Болотина Е. В., Турутин А. В.</i>	907
Оптические, электрические и магнитные свойства карбида кремния с кремниевыми вакансиями <i>Кукушкин С. А., Осипов А. В.</i>	910
Применение методов искусственного интеллекта для оптимизации эпитаксиальных процессов <i>Редьков А. В., Троценко Д. И.</i>	912
Совершенствование методики селективного травления пластин арсенида галлия <i>Вербицкий Р. А., Сыров Ю. В., Князев С. Н., Ползикова К. С.</i>	914



Исследование тонких пленок никеля, полученных методом атомно-слоевого осаждения, для применений в электронике <i>Якушев В. А., Вишнеvский А. С., Воротилов К. А.</i>	917
Исследование структуры монокристаллического алмаза, выращенного методом CVD, в зависимости от продолжительности роста <i>Балинов Д. А., Кан В. Е., Кириченко А. Н., Родионов Н. Б.</i>	919
Современное состояние технологий выращивания и обработки полупроводниковых соединений группы A ^{III} B ^V <i>Нестюркин М. С., Козлов Р. Ю., Комаровский Н. Ю., Молодцова Е. В., Трофимов С. С.</i>	921
Экспериментальное исследование активных и пассивных элементов на основе гетероструктур A ^{III} B ^V для СВЧ МИС МШУ X-, Ku-диапазона <i>Цунваза Д., Каргин Н. И., Рыжук Р. В., Васильевский И. С., Клоков В. А., Захарченко Р. В.</i>	923
Наномасштабный карбид кремния на кремнии для микро- и оптоэлектроники <i>Кукушкин С. А., Осипов А. В.</i>	925
Специальные подложки кубического карбида кремния на кремнии (3C-SiC/Si) для роста транзисторных гетероструктур Ga(Al)N <i>Федотов С. Д., Гращенко А. С., Редьков А. В., Кукушкин С. А., Царик К. А., Стаценко В. Н.</i>	927
Опыт импортозамещения материалов для производства МКК для ИС. Пути и перспективы решения вопросов по замене импортных материалов <i>Егошин В. А., Шугаев Ш. Н., Ахметгалиев Р. Ш., Ермолаев Е. В.</i>	929
Пути функциональной интеграции полупроводниковых приборов благодаря использованию кремниевых структур со сквозными каналами р-типа <i>Скиданов А. А., Царева Е. А., Венецев С. М., Коновалов А. В., Середин Б. М.</i>	931
Методика подбора системы добавок к электролиту для электрохимического осаждения меди методом двойного дамасцена <i>Кирюшина И. В.</i>	933
Высококонтрастный щелочной проявитель для процессов фотолитографии <i>Кулинич И. В., Кисилев С. А., Непомнящих Д. В., Куценко М. А., Меньшова А. В.</i>	936
Создание технологии производства ПАВ для безметалльного проявителя <i>Тарасов А. Е., Курбатов В. Г., Пугачева Т. А., Варламов Д. А., Сенченко Н. С., Малков Г. В., Бадаמיшна Э. Р.</i>	938
Исследование эволюции массивов плазмонных наночастиц на поверхности SiO ₂ в процессе отжига <i>Гришин Т. С., Волкова Л. С., Громов Д. Г.</i>	940
Исследование поверхности пластин поликристаллического алмаза после термохимической обработки <i>Дерябкин А. В., Куликов Е. Н., Федоров Ю. Ю.</i>	942

Особенности пробоподготовки современных СБИС для исследований с помощью ПЭМ <i>Волкова Л. С., Гришин Т. С.</i>	943
ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ.....	945
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	945
Перспективы высокопроизводительной печатной электроники на основе неорганических полупроводников <i>Иванов В. В.</i>	945
Квантовые точки и лазеры на их основе для интегральной оптоэлектроники <i>Жуков А. Е., Иванов К. А., Комаров С. Д., Махов И. С., Мельниченко И. А., Моисеев Э. И., Надточий А. М., Крыжановская Н. В.</i>	947
SiGe-гетероструктуры в микрорезонаторах для создания Si-совместимых излучателей ближнего ИК-диапазона <i>Юрасов Д. В., Степихова М. В., Яблонский А. Н., Перетокин А. В., Шалеев М. В., Дьяков С. А., Гиппиус Н. А., Тиходеев С. Г., Родякина Е. Е., Смагина Ж. В., Новиков А. В.</i>	949
Квантовая наноэлектроника: фундаментальные ограничения и перспективы развития <i>Арутюнов К. Ю.</i>	951
SPICE-моделирование ВАХ КНС КМОП-транзисторов с учетом технологического разброса параметров и воздействия температуры <i>Старилова Е. В., Хобов А. П., Исмаил-Заде М. Р.</i>	953
Кварцевые генераторы. Перспективы развития <i>Ложников А. О.</i>	956
Наноэлектроника на сверхпроводниках — челлендж или альтернатива <i>Пугач Н. Г., Лекомцев Н. В., Львов Б. Г., Екомасов Е. Г.</i>	958
Контроль параметров процессов в технологическом цикле производства КМОП ИС <i>Волоховский А. Д.</i>	960
Исследование процессов дефектообразования в эпитаксиальных гетероструктурах методами высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии <i>Фалеев Н. Н., Maros A., Zhang C., Gangopadhyay A., Smith D. J., Honsberg C. B.</i>	963
Магнитная память с произвольным доступом к данным, управляемая с помощью зарядовых токов, SOT-MRAM <i>Давыденко А. В., Козлов А. Г., Базров М. А., Намсараев Ж. Ж., Летушев М. Е., Черноусов Н. Н., Турпак А. А.</i>	965
Перспективы развития нейроморфных процессоров для систем искусственного интеллекта <i>Логунов М. В.</i>	967



Интервальные модели динамических систем <i>Морозов А. Ю., Абгарян К. К., Ревизинов Д. Л.</i>	969
Новые подходы к созданию компонентов для биоэлектроники <i>Герасименко А. Ю.</i>	971
Сверхгибкая сегнетоэлектрическая память на биосовместимой платформе <i>Чуприк А. А.</i>	973
Распознавание и классификация паттерна физиологического тремора с помощью акселерометрии в системе анализа мышечного утомления и восстановления умного костюма Muscles.AI <i>Селезнева Л. Г., Улыбин В. В.</i>	975
Преимущества и недостатки ВЧ и СВЧ методов регистрации спада фотопроводимости для определения рекомбинационного времени жизни носителей заряда в кремнии <i>Кобелева С. П., Анфимов И. М., Юрчук С. Ю., Шемеров И. В.</i>	977
СЕКЦИЯ № 1 «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ»	980
Влияние параметров атомно-слоевого осаждения на количество проводящих филаментов в мемристорных структурах на основе оксида гафния <i>Исаев А. Г., Пермякова О. О., Мягоньких А. В., Рогожин А. Е.</i>	980
Низкотемпературное окисление кремния с использованием генератора озона <i>Горохов С. А., Патюков С. И., Черняев М. В., Резванов А. А.</i>	982
Оптические методы контроля и характеризации при производстве гетероструктур для полевых транзисторов на основе GaN <i>Артеев Д. С., Сахаров А. В., Николаев А. Е., Заварин Е. Е., Родин С. Н., Лундин В. В., Цацульников А. Ф.</i>	984
Процесс атомно-слоевого осаждения оксида гафния и оксида циркония: эксперимент и модельное представление <i>Зюзин С. С., Резванов А. А., Ганыкина Е. А., Резник А. А., Гвоздев В. А.</i>	986
Исследование оптических и размерных свойств пленок платины, полученных методом сухой аэрозольной печати <i>Новосёлов А. К., Санатулина А. Ф., Вершинина О. В., Каменева Е. И., Токунов Ю. М., Мало Д., Лизунова А. А.</i>	988
Исследование адгезионных свойств оснований печатных плат после плазмохимического травления при различных температурах хранения <i>Аверина А. И., Каширин Н. В., Сидоров Р. В.</i>	990
Стратегия и тактика в разработке стабильного процесса плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления <i>Шибанов Д. Р., Лопавев Д. В., Рахимов А. Т., Рахимова Т. В.</i>	992
Изучение влияния состава газовой смеси на профиль травления межсоединений металлических слоев в технологическом процессе КМОП 180 нм <i>Михайлова А. В., Травкина Д. С., Степанов А. А., Леготин С. А.</i>	994

Исследование механизма атомно-слоевого травления диэлектриков в установке плазмохимического травления <i>Кузьменко В. О., Мельников А. Е., Мяконьких А. В.</i>	996
Исследование процесса селективного плазмохимического травления слоя р-GaN в гетероструктуре GaN/AlGaN <i>Тахири П. Ю., Зайцев А. А., Егоркин В. И.</i>	998
Влияние контактных явлений при проведении зондовых параметрических измерений низкоразмерных областей <i>Спиридонов С. В.</i>	1000
Изготовление плазмонных наноструктур платины методами печатной электроники для усиления фотолюминесценции <i>Керечанина М. Ф., Храмов Е. С., Санатулина А. Ф., Новосёлов А. К., Лизунова А. А., Иванов В. В.</i>	1002
Процессы гидрофобизации пористых органосиликатных пленок для систем многоуровневой металлизации ИС <i>Воротынцеv Д. А.</i>	1005
Разработка отечественной UHF-микросхемы для применения в области радиочастотных меток <i>Эпов И. В., Резник А. Ю.</i>	1007
Разработка чернил на основе InGaZnO для печатной микроэлектроники <i>Филалова Э. М., Каменева Е. И., Лизунова А. А., Иванов В. В.</i>	1009
Влияние режимов магнетронного напыления на свойства мемристорov, изготовленных из ZrO ₂ <i>Шулаев Н. А., Бобылев А. Н., Губин А. А., Удовиченко С. Ю.</i>	1011
Анализ влияния добавки благородных и молекулярных газов на электрофизические параметры тлеющего разряда постоянного тока трихлорида бора <i>Гришков А. Э., Мурин Д. Б.</i>	1013
Сравнение физико-химических свойств фторидов и оксидов металлов для применения в технологии микроэлектроники <i>Орлов В. О.</i>	1015
Разработка электростатического прижима для оборудования микроэлектроники <i>Трактирщиков В. С., Ширяев М. Е., Корячко В. В.</i>	1017
Кинетика травления кремния в тлеющем разряде тетрафторметана <i>Чесноков И. А., Мурин Д. Б.</i>	1019
Модельно-аналитическое исследование электромеханических свойств гибридных органосиликатных пленок <i>Цепкин М. В., Резванов А. А.</i>	1021
Электронные свойства сверхтонких слоев MoS ₂ , полученных методом сульфидизации <i>Козодаев М. Г., Маркеев А. М.</i>	1023



Технологии повышения воспроизводимости джоулефовских переходов Al/AIOx/Al для сверхпроводниковых интегральных схем <i>Коршаков Н. Д., Москалев Д. О., Соловьева А. А., Москалева Д. А., Телеганов М. И., Андрицук М. В., Родионов И. А.</i>	1025
Формирование металлических микроразмерных структур методом сухой аэрозольной печати с лазерным спеканием <i>Долгов В. А., Корнюшин Д. В., Борисов В. И., Иванов М. С., Каменева Е. И., Ворошилова В. А., Иванов В. В.</i>	1027
Исследование и разработка технологических процессов для уменьшения длины затвора ПТШ <i>Маркус Д. В., Рогачёв И. А., Игнатъев О. И.</i>	1030
Результаты по опробованию отечественных ПАВ в технологии получения безметалльного проявителя, применяемого в микроэлектронных производствах современного уровня (180–90 нм) <i>Сеньченко Н. С., Варламов Д. А., Щербаков Н. А., Курбатов В. Г.</i>	1032
Исследование продукции в целях предупреждения или выявления дефектности на различных этапах производства микроэлектроники <i>Рудометов Я. А., Нелюбин И. В., Волоховский А. Д.</i>	1035
Влияние технологических параметров процесса на энергетический спектр ионов в индуктивно-связанной плазме: моделирование и исследование IEDF в смесях с аргоном <i>Халилуллин Р. Р., Кузьменко В. О., Мяконьких А. В.</i>	1037
Исследование аморфных диэлектрических пленок интегральных микросхем методами электронной микроскопии <i>Романенко П. М., Румянцев А. В., Волков Р. Л., Макеева О. В.</i>	1039
Разработка технологии низкотемпературной диффузионной сварки тонких кремниевых чипов и пластин через соединительные слои на основе меди и серебра <i>Чертков А. В., Калашников С. А., Краснов П. С., Козлов В. А.</i>	1041
Перспективы развития отечественных технологий переработки сырья и получения материалов на основе редких и редкоземельных металлов для микроэлектроники <i>Лебедева Д. А., Ивановских К. В., Потемкина О. В., Щелконогов М. А.</i>	1043
Разработка масштабируемой технологии формирования наноразмерных структур на основе волноводов нулевой моды для одномолекулярного секвенатора ДНК <i>Кругук А. К., Барбашева А. А., Муравьева Л. Н., Коршаков Н. Д., Алибеков Р. Ш., Шувалова А. С., Баклыков Д. А., Соловьева А. А., Рыжков В. В., Родионов И. А.</i>	1044
PIN-фотодетекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе гетероструктур InGaAs/InAlAs/InP с метаморфными буферными слоями <i>Баранцев О. В., Василькова Е. И., Пирогов Е. В., Воронаев К. О., Васильев А. А., Карачинский Л. Я., Новиков И. И., Соболев М. С.</i>	1046

Разработка и анализ методики для создания токопроводящих структур на поверхности пластиков путем лазерного структурирования <i>Сафонов Т. С., Рябов Е. Д.</i>	1048
Исследование процессов фокусирования и осаждения наночастиц через электростатическую матричную линзу <i>Масленников Д. В., Патарашивили А. Н., Ефимов А. А.</i>	1050
Технологические особенности формирования эпитаксиальных структур кремния для высокоэффективных СВЧ-диодов <i>Дубкова А. С.</i>	1053
Исследование свойств пленок из наночастиц алюминия, полученных методом сухой аэрозольной печати <i>Санатулина А. Ф., Новоселов А. К., Мало Д., Лизунова А. А.</i>	1055
Исследование метода синтеза оксида графена для приложений силовой электроники <i>Кузнецова В. В., Спиридонов С. В., Морозов М. В., Дробышев С. В.</i>	1057
Технология изготовления магнитных Холл-структур на поверхности чешуек графита <i>Силина С. К., Турпак А. А., Шишелов А. Ф., Давыденко А. В., Куркина И. И.</i>	1059
Изготовление высоковольтного диода с использованием кремниевых структур со сквозными каналами <i>p</i> -типа <i>Царева Е. А., Скиданов А. А., Коновалов А. В., Вeneвцев С. М., Середин Б. М.</i>	1061
Влияние параметров импульсного лазерного излучения на процессы модификации наночастиц металлов в аэрозольном потоке <i>Ворошилова В. А., Корнюшин Д. В., Борисов В. И., Долгов В. А., Иванов М. С., Иванов В. В.</i>	1062
Разработка и оптимизация метода сенсбилизации и дальнейшей металлизации полимерных изделий, полученных с использованием аддитивных технологий <i>Карзакова В. С., Тюрина С. А., Демин В. Л.</i>	1064
Разработка технологии изготовления воздушных мостов для сверхпроводниковых интегральных схем <i>Телеганов М. И., Смирнов Н. С., Коршаков Н. Д., Родионов И. А.</i>	1066
Маскирующие слои для плазмохимического травления толстых диэлектрических слоев слабоотвержденного Cycolotene 3022-63 <i>Аворник Т. В., Гусева Е. А., Аворник О. Ф., Алмазов О. Б.</i>	1068
Повышение надежности микросхем через многофакторный подход и интеграцию системы менеджмента качества <i>Мкртчян Г. А.</i>	1070
Контрольно-измерительное оборудование, применяемое при производстве изделий микроэлектроники <i>Нелюбин И. В., Волоховский А. Д.</i>	1072



Разработка комплекса оптической инспекции топологии микронэлектронных компонентов <i>Чученков Д. А., Васильченко Д. В., Ромащенко М. А.</i>	1074
Фотодетекторы УФ-диапазона на основе ультратонких слоев GaN <i>Шубина К. Ю., Сеницкая О. А., Эннс Я. Б., Мизеров А. М.</i>	1077
СЕКЦИЯ № 2 «ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ»	1079
Разработка маршрутов проектирования смарт-датчиков для автономных и космических систем <i>Аряшев С. С., Верник П. А., Краснюк А. А., Роцин Д. А.</i>	1079
Результаты создания маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ <i>Верник П. А., Аряшев С. С.</i>	1081
Топологическое моделирование элемента ПЛИС с комбинированным кодированием <i>Васенин И. А.</i>	1083
Сохранение конфигурации топологии IP при иерархической миграции <i>Михайлова Е. А.</i>	1085
Внедрение современных методов разработки технической документации в средствах проектирования <i>Штрыков П. С., Седов В. В., Надин А. С.</i>	1087
Быстродействующий КМОП операционный усилитель с широким динамическим диапазоном входных сигналов <i>Двинских П. Д.</i>	1089
Сложнофункциональный блок гибридного АЦП <i>Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Чербов А. Д., Норманов Д. Д., Аткин Э. В.</i>	1091
Разработка блока проверки целостности информации для встраиваемой флеш-памяти <i>Макеев Г. А., Алексеев В. Д., Васильев Е. С.</i>	1093
Разработка сложнофункционального блока однократно программируемого ПЗУ на базе отечественной КМОП-технологии 90 нм <i>Ермаков И. В., Демин К. П.</i>	1095
Разработка дизайна усилителя со сложным каскодом по технологии КМОП 90 нм <i>Шумов А. Д., Певцов Е. Ф.</i>	1097
Разработка системы быстрых тестов для проверки качества и функциональности файлов и инструментов PDK <i>Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С.</i>	1100
Снижение влияния паразитных элементов в высокочастотных ЦАП большой разрядности <i>Колосков Д. Б., Глухов А. В.</i>	1103

Организация предсказателя адресов переходов для инструкций с косвенной адресацией в составе RISC-микропроцессора <i>Золотой Л. К.</i>	1105
Эффективный по занимаемой площади метод реализации аппаратной поддержки криптографической защиты информации <i>Зубрицкий И. В., Альфонсо Д. М.</i>	1107
Инструмент ускоренного высокоуровневого синтеза СФ-блоков обработки сигналов <i>Зарипов Р. А., Зиновчик О. Ю., Чесноков В. Н.</i>	1110
Разработка прецизионного генератора опорной частоты 96 МГц <i>Гусихин И. В., Кудяков А. А.</i>	1112
Прототипная специализированная интегральная микросхема для съема и обработки сигналов с микрополосковых сенсоров <i>Ямалиев С. И., Аткин Э. В., Норманов Д. Д., Бочаров Ю. И., Бутузов В. А., Юровский В. О., Лобанков Д. С.</i>	1114
Исследование ограничений минимизации площади топологии цифроаналогового преобразователя <i>Цепилова А.</i>	1116
Разработка методики раскрытия содержимого ОЗУ микроконтроллера с использованием анализа энергопотребления <i>Алексеев В. Д., Тишин А. С., Михайлов В. Ю.</i>	1118
СЕКЦИЯ № 3 «ВСТРАИВАЕМЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И КОНЕЧНЫЕ УСТРОЙСТВА»	1120
Разработка быстрого индикатора срыва сопровождения навигационного сигнала ГНСС <i>Калягин А. В., Соколов И. М.</i>	1120
Использование кластеров микроэлектромеханических датчиков в навигационных системах <i>Кузнецов М. А.</i>	1122
Структура навигационных комплексов летательных аппаратов <i>Суркова А. Д.</i>	1124
Оптимизация передачи управления в процессорах «Эльбрус» <i>Бер Н. А.</i>	1126
Разработка и исследование модуля управления портативными экструдерами <i>Бадалян Р. К., Мотайленко И. А.</i>	1128
Внедрение цифрового двойника через микрокомпьютер в систему управления и контроля литий-ионных аккумуляторов <i>Дружинин А. А.</i>	1131
КВ-трансивер для гидрологического подвижного буя <i>Васильев А. В., Вязенцев Я. А., Калужный Б. К.</i>	1133



Разработка модуля расширения функционала СКУД для отслеживания состояния контрольных точек и оповещения в Telegram <i>Фролов А. В., Бойков С. Ю.</i>	1134
Структура системы оценки показателей зрения человека <i>Буцкий Д. О., Алешина А. И., Чиглинцева С. А.</i>	1135
Алгоритмы, датчики и исполнительные устройства в человеко-машинном интерфейсе при управлении робототехническими комплексами в условиях недостаточной осведомленности об их состоянии и положении <i>Гладченко А. А., Тельминов О. А.</i>	1137
Методы повышения качества обслуживания трафика нагруженных сетей с применением высокоскоростного тракта обработки сетевых пакетов <i>Горчакова М. А., Елизаров С. Г., Гончаров С. В., Тельминов О. А.</i>	1139
Обработка изображений при помощи ПЛИС <i>Усов Д. А., Манцурова Н. А., Певцов Е. Ф.</i>	1141
Методы уменьшения массы радиоэлектронной аппаратуры на этапе моделирования конструкции в САД-системах <i>Коротков М. Д., Тимошенков С. П.</i>	1142
Влияние длины последовательности шума, генерируемого оптическим генератором случайных чисел, на эффективность прохождения тестов NIST <i>Мавков Д. А., Сибгатуллин М. Э., Гилязов Л. Р., Арсланов Н. М.</i>	1144
Система сбора данных на основе AVR-микроконтроллера ATmega328 для модернизации аналоговых вакуумметров <i>Анохин А. Л., Холодков И. В.</i>	1146
Разработка системы управления технологическим оборудованием на базе отечественного программируемого логического контроллера серии «Багет» <i>Бутманов Д. Д., Голяков М. А., Гришин А. А.</i>	1148
Реализация фильтра Калмана на ПЛИС <i>Самофалов А. М., Ларионов М. В., Певцов Е. Ф.</i>	1150
Разработка уточненного метода оценки надежности систем промышленного Интернета вещей <i>Цветков В. Э., Ландер Л. Б., Королев П. С.</i>	1152
СЕКЦИЯ №4 «ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОТОНИКА»	1153
Численное исследование оптического диода на основе двумерных фотонных кристаллов <i>Мокшин П. В.</i>	1153
Исследование и анализ нелинейно-оптических эффектов в кремниевых шелевых волноводных структурах <i>Мурзаалина С. М., Барабаненков М. Ю.</i>	1154
Управление оптическим излучением наноструктур GeSiSn/Si при помощи металлических наноантенн <i>Хахулин С. А., Коляда Д. В., Фирсов Д. Д., Комков О. С., Тимофеев В. А., Скворцов И. В., Машанов В. И., Гайдук А. Е., Уткин Д. Е.</i>	1158

Разработка модели интегрального фотонного чувствительного элемента с применением углеродных нанотрубок <i>Митрофанова А. Е., Барабаненков М. Ю., Светиков В. В., Ромашкин А. В.</i>	1160
Формирование сверхпроводящих пленок Nb_3Al для интегрального однофотонного детектора в планарных ионных ловушках <i>Хыдырова С. Ю., Ломакин А. И., Ковалюк В. В., Гольцман Г. Н., Моисеев К. М.</i>	1163
Методы оценки поляризационно-зависимых характеристик электрооптических модуляторов на платформе из нитрида кремния <i>Амирасланов А. Ш., Бабурин А. С., Лотков Е. С., Авдеев С. С., Бузаверов К. А., Родионов И. А.</i>	1165
Вычислительная сложность программирования фотонных интегральных схем, построенных на базе интерферометра Маха — Цендера <i>Суроегина А. Е., Барабаш Н. В., Бобров А. И.</i>	1167
Оценки точности вычислений на фотонной интегральной схеме, построенной на базе неидеальных интерферометров Маха — Цендера <i>Барабаш Н. В., Сидоренко К. В., Нежданов А. В., Бобров А. И.</i>	1169
Моделирование волноводных делителей для снижения неравномерности потерь AWG-мультиплексора <i>Бабичек И. В., Сапегин А. А.</i>	1171
Получение и исследование фотонно-кристаллических структур фиброина шелка на основе пленок коллоидного полистирола и кремнезема для изделий биофотоники <i>Медведева О. М., Панфилова Е. В., Ибрагимов А. Р., Мозер К. В.</i>	1176
Разработка процессов формирования слоев $SiON$, SiO_2 и БФСС методом PECVD для создания волноводных структур фотонных интегральных схем <i>Митрофанов Я. Ю., Светиков В. В., Абросимов В. Ю.</i>	1178
Волоконно-оптические элементы отечественного производства для ввода-вывода излучения при сборке фотонных интегральных схем <i>Паньков А. С., Пономарев Р. С.</i>	1180
Детектор терагерцевого излучения на основе графена, интегрированного на кремниевый волновод <i>Измайлов Р. И., Любчак А. Н., Шеин К. В., Гайдученко И. А., Гольцман Г. Н.</i>	1182
Управление зонной структурой и люминесцентным откликом двумерных фотонных кристаллов с наноостровками $Ge(Si)$ <i>Перетокин А. В., Степихова М. В., Юрасов Д. В., Яблонский А. Н., Шалеев М. В., Дьяков С. А., Родякина Е. Е., Новиков А. В.</i>	1184
Моделирование микрорезонаторов на зеркалах с брэгговскими решетками <i>Станкевич К. М., Бутковский О. Я.</i>	1186
Новый подход к созданию активных фотонных элементов <i>Егоров П. А., Тимошенков А. С.</i>	1187
Двумерные диэлектрические металлинзы для создания портативных биосенсоров одиночных молекул <i>Барулин А. В., Новиков С. М., Чернов А. И.</i>	1188



Расчет потерь одномодового режима распространения оптического излучения в микроволноводах из GaAs/AlGaAs и AlGaAs на изоляторе <i>Крылова О. А., Витько В. В., Еськов А. В., Никитин А. А., Семенов А. А., Устинов А. Б.</i>	1189
Моделирование модовых конвертеров на основе волнового и субволнового сегментированного тейпера <i>Крылов А. А., Барабаненков М. Ю., Светиков В. В., Шамин Е. С.</i>	1191
СЕКЦИЯ № 5 «МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ»	1194
Механизмы влияния начального состава смесей $CF_4 + O_2$, $CHF_3 + O_2$ и $CF_4 + CHF_3 + O_2$ на параметры плазмы и кинетику реактивно-ионного травления кремния <i>Казначеева Е. М., Ефремов А. М.</i>	1194
Модель плазмохимического травления Si в среде SF_6/O_2 с использованием графовых нейронных сетей <i>Кузьмин В. О., Седунов С. М.</i>	1196
Параметры плазмы, концентрации активных частиц и закономерности реактивно-ионных процессов в смесях фторуглеродных газов с аргоном и гелием <i>Малинина К. А., Ефремов А. М.</i>	1198
Исследование параметров плазмы и кинетики реактивно-ионного травления поликремния в смеси Cl_2/Ar <i>Оксаниченко Ф. В., Ефремов А. М.</i>	1200
Влияние геометрии реактора на однородность осаждения алмаза методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на частоте 2,45 ГГц <i>Хозин Р. Р., Лещев Д. В., Горбачев Ю. Е.</i>	1202
Исследование влияния кислородных вакансий на зонную структуру тонких пленок титаната бария с использованием методов теории функционала плотности <i>Левичев М. В., Андреева Н. В.</i>	1205
Использование уравнения Ландау — Лифшица для моделирования структур с магниторезистивными свойствами <i>Шербаков В. С., Абгарян К. К., Ревизников Д. Л.</i>	1206
Математическая модель для прогнозирования электрофизических характеристик GaAs НЕМТ на основе метода Монте-Карло <i>Карпов С. Н.</i>	1208
Особенности моделирования НЕМТ-транзистора на основе гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN со спейсерным слоем AlN <i>Неволина Т. Н., Рыжук Р. В., Цунваза Д., Гусев А. С., Каргин Н. И., Захарченко Р. В.</i>	1211
Разработка системы генерации данных для системы Machine Learning TCAD <i>Бабурин А. И., Силкин Д. С., Попов Д. А., Пригородов Р. А., Яковлева Е. Д.</i>	1213

Эффект аутдиффузии примеси из приповерхностного слоя полупроводника при моделировании в TCAD термических процессов в среде, содержащей кислород <i>Федотов А. В.</i>	1216
Численное моделирование процесса резистивного переключения элемента энергонезависимой памяти на основе технологии ReRAM <i>Журавлев А. А., Абгарян К. К., Ревизников Д. Л.</i>	1217
Определение объема аппаратной избыточности, вводимой в целях повышения отказоустойчивости матриц памяти ReRAM <i>Петрова С. И., Теплов Г. С.</i>	1219
Исследование контактных явлений в многослойных фотоэлектрических преобразователях на кристаллических и неупорядоченных полупроводниках <i>Полагин М. В., Мишустин В. Г.</i>	1222
Расчетно-экспериментальная оценка срока службы солнечных элементов в заданных радиационных условиях <i>Степанов М. А.</i>	1224
Прогнозирование электрических параметров кремниевых солнечных элементов на низкой околоземной орбите <i>Феклистова А. А., Рябцева М. В., Чуянова Е. С., Вагапова Н. Т.</i>	1225
Электронно-лучевая полировка пластин карбида кремния <i>Атаманчук А. А., Авдеев С. П.</i>	1227
Оптимизация формы сверхширокополосного зондирующего сигнала для максимизации нелинейного отклика от объекта зондирования по основанной на измерениях модели <i>Безрукова И. В., Семенов Э. В.</i>	1230
Разработка компактных SPICE-моделей МОП-транзисторов с учетом разброса температурно-зависимых параметров <i>Хлынов П. А., Самбурский Л. М.</i>	1232
Моделирование селектора ReRAM на основе туннельного диода <i>Курьянов А. О., Теплов Г. С.</i>	1234
Электротепловое моделирование мощных схем с использованием ПО Python Spice <i>Зубкова А. И., Харитонов И. А.</i>	1236
Модернизация системы охлаждения фокальной плоскости оптико-электронного преобразователя <i>Трофимов Д. А., Лавренов В. А.</i>	1239
Перераспределение примеси на границе поликремний — кремний при моделировании диффузии из поликремния в TCAD при различных моделях диффузии <i>Федотов А. В., Самбурский Л. М.</i>	1240
Моделирование поведения частицы в наноструктурах методом конечных разностей во временной области в программной среде Matlab <i>Форофонов И. А.</i>	1241



СЕКЦИЯ №6 «СВЧ И СИЛОВЫЕ ПРИБОРЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ».....	1244
Моделирование структур на криволинейных поверхностях <i>Чечеткин В. А., Шабунин С. Н.</i>	1244
К расчету электродинамических параметров несимметричной микроразветвленной линии <i>Ярылков А. Д., Сазонов Е. С.</i>	1245
Масштабируемая модель круглой спиральной катушки индуктивности для проектирования МИС СВЧ по технологии GaAs <i>Луняков А. Е., Дудинов К. В., Ефимов А. С.</i>	1249
Новый подход интеграции гетероструктур AlGaIn/GaN и алмазного теплоотвода <i>Колобкова Е. М., Езубченко И. С., Занавескин М. Л.</i>	1252
Нормально-закрытый GaN силовой транзистор на рабочие напряжения до 100 В <i>Гребенников В. А., Желаннов А. В., Баранов Г. Б., Леоненков Е. И., Дорофеев А. А.</i>	1254
Несплавные омические контакты к структурам НЕМТ GaN <i>Добров А. В., Рогачёв И. А., Орехова О. А., Котосонова А. В., Дудинов К. В., Красник В. А., Каргин Н. И., Цацульников А. Ф., Егоркин В. И.</i>	1257
Исследование тенденций развития конструкций силовых вертикальных GaN-транзисторов <i>Беляев А. О., Баранов Г. В., Дорофеев А. А., Панасенко П. В.</i>	1260
Глубокие ловушки и диффузионные длины носителей заряда в гетеропереходах NiO/ β -Ga ₂ O ₃ <i>Поляков А. Я., Якимов Е. Б., Саранин Д. С., Черных А. В., Васильев А. А., Гостищев П., Кочкова А. И., Алексанян Л. А., Матрос Н. Р., Шемеров И. В., Пиртон С. Дж.</i>	1262
К вопросу определения фазовых сдвигов в смесителе <i>Сердюков В. В.</i>	1264
Комплексная разработка технологии изготовления СВЧ монолитных интегральных схем дециметрового диапазона на основе гетероструктур GaAs <i>Орлова Д. А., Драгутъ М. В., Смирнов Ю. Ю.</i>	1266
Исследование технологических особенностей изготовления маломощных GaAs pHEMT с длиной Т-затвора 150 нм и монолитных интегральных схем на их основе <i>Шестериков А. Е., Шестерикова Д. А., Ерофеев Е. В.</i>	1268
Технология заполнения вертикальных зазоров в квазимонолитных СВЧ- устройствах полиимидом <i>Гусева Е. А., Аворник Т. В., Аворник О. Ф., Тихонов В. А., Петрова И. В.</i>	1272
Исследование проблем теплового распространения в малогабаритных СВЧ приемо-передающих модулях АФАР <i>Панасенко П. В., Волосов А. В., Пяточкин М. Д.</i>	1274

Измерение электродинамических характеристик материала для производства малогабаритных антенн с помощью аддитивных технологий <i>Бурлаков К. А., Насибуллин Д. А.</i>	1276
Генерация геометрии антенны с заданной диаграммой направленности <i>Бурцев В. Д., Филонов Д. С.</i>	1278
Учет условий эксплуатации при оценке электродинамических характеристик материалов <i>Кривоногова Д. Е., Малкин А. И.</i>	1279
Фазированная антенная решетка для низкоорбитальных спутниковых группировок <i>Филонов Д. С., Никулин А. В.</i>	1280
Фазированная антенная решетка для терминалов спутниковой связи Ка-диапазона <i>Цитович А. А., Кучмий А. Д., Кузнецов В. В., Плотников И. С., Дехтярь Т. А.</i>	1281
Экспериментальное исследование температурных характеристик элементов на пластине GaAs в СВЧ-диапазоне частот <i>Цунваза Д., Каргин Н. И., Рыжук Р. В., Васильевский И. С., Неволina Т. Н., Клоков В. А.</i>	1282
Обзор моделей радиоканалов современных систем связи <i>Михайлов В. Ю.</i>	1284
Улучшение эффективности проектирования объемных СВЧ-меток через интеграцию методов машинного обучения <i>Пискун И. А., Тельминов О. А., Резник А. Ю.</i>	1286
Численное моделирование индукционных катушек антенн для идентификации подземных инфраструктурных сетей <i>Соболев И. А., Резник А. Ю., Тельминов О. А.</i>	1287
СЕКЦИЯ № 7 «НЕЙРОМОРФНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ»	1289
Моделирование особенностей работы мемристивного кроссбар-массива в нейроморфных электронных модулях <i>Дудкин А. П., Андреева Н. В., Рындин Е. А.</i>	1289
Обзор современного состояния мемристивных структур на основе GaO ₂ <i>Мизгинов Д. С., Тельминов О. А., Горнев Е. С.</i>	1292
Исследование резистивного переключения в легированных азотом углеродных нанотрубках <i>Польвянова М. Р., Соболева О. И., Ильина М. В., Ильин О. И.</i>	1294
Дизайн матриц нейроморфных устройств для создания нейросетевых архитектур <i>Писарев А. Д., Николаева Е. А.</i>	1296
Проектирование LIF-нейрона на основе обучаемых наноматериалов и компонентов твердотельной электроники <i>Боровинский В. К., Писарев А. Д.</i>	1298



Разработка аппаратной импульсной нейронной сети <i>Писарев П. А., Писарев А. Д.</i>	1300
Модель нейроморфного спайкового генератора на основе мемристивных наноустройств <i>Кипелкин И. М.</i>	1302
Исследование свойств латентного пространства модели автоэнкодера для детектирования аномалий в отклике транзисторов <i>Чернова А. С., Мещанинов Ф. П., Жевненко Д. А.</i>	1304
Разработка нейронной сети для системы поддержания работоспособности водителя на основе компьютерного зрения <i>Быканова У. Ф., Сметанин И. А., Сметанин Е. А., Асоян А. Р.</i>	1306
Применение нейроморфных систем для решения задачи трекинга <i>Передерин И. Д., Евсиков В. А.</i>	1308
Применение режима безопасных вычислений платформы «Эльбрус» в технологиях машинного обучения <i>Марченко И. В., Титов Е. М., Ярапов Д. В.</i>	1310
Использование LLM при проектировании РЭА и ЭВМ <i>Зинченко Л. А., Казаков В. В., Терехов В. В., Карышев Б. В., Дорофеев А. В.</i>	1311
Перспективы развития рынка чипов в Российской Федерации <i>Батманова А. Н.</i>	1313
Математическое моделирование для оценки инвестиционной эффективности при разработке сложной бортовой аппаратуры <i>Кузнецова Е. С., Пепеляева А. И., Иванченко С. А., Терешкович В. Н., Бобриков Д. А.</i>	1315
Оптимизация процессоров для эффективной работы нейронных сетей <i>Сметанин Е. А., Сметанин И. А., Быканова У. Ф., Асоян А. Р.</i>	1317
Нейросетевой подход к прогнозированию разводимости при проектировании СБИС с учетом начальных параметров топологии <i>Сайбодалов М. Х., Дашиев М. В., Карандашев Я. М., Желудков Н. В., Кочева Е. С.</i>	1319
Интеграция алгоритмов искусственного интеллекта для распознавания изображений на одноплатных компьютерах: методы и практическое применение <i>Ахметшин Д. А.</i>	1322
Исследование эффективности методов обучения нейронных сетей в решении задачи классификации на основе малых данных <i>Маврин И. А., Андреева Н. В., Рындин Е. А.</i>	1326
СЕКЦИЯ № 8 «ШКОЛА НИИМЭ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЛИТОГРАФИИ»	1328
Применение методов глубокого обучения в задаче коррекции эффектов оптической близости <i>Московцев А. Ф., Харченко Е. Л.</i>	1328
Разработка подхода по выбору набора данных для нейросетей, моделирующих процесс экспонирования в фотолитографии, на основе нейрооператоров Фурье <i>Кошляков А. В., Метельников А. А.</i>	1330

Инструмент для автоматизации входного контроля топологий при проектировании фотошаблонов <i>Колупаев М. Е., Медведев К. А., Рябинин А. Д.</i>	1332
Программный модуль автоматизации процесса подготовки управляющей информации для производства фотошаблонов <i>Шохрин Р. С., Костюк М. Д., Капкин И. Д.</i>	1334
Коррекция элементов фотонных ИС в целях учета ограничений фотолитографии <i>Степанова М. Г., Харченко Е. Л.</i>	1336
Перспективы развития производства фотошаблонов для технологий уровня до 65 нм в России <i>Свистунова В. В., Шарипов Р. А.</i>	1338
Сравнение оптических свойств слоев силицида молибдена и силицида тантала, применяемых для формирования фазосдвигающих покрытий фотошаблонов <i>Шарипов Р. А., Лебедев Е. А., Громов Д. Г., Громов В. Д., Рязанов Р. М.</i>	1340
Разработка системы оптической инспекции фотолитографического процесса <i>Паршин С. Н., Золкин Г. П., Васильченко Д. В., Ромащенко М. А.</i>	1342
Алгоритм подбора оптимального литографического стека в целях минимизации эффекта стоячих волн <i>Уткина А. А., Харченко Е. Л.</i>	1344
Анализ и сравнение оптимизационных алгоритмов для задачи определения правил расстановки непечатаемых вспомогательных структур с учетом их влияния на шероховатость <i>Шамин Е. С., Шарипов А. А., Скуратов И. Д., Горнев Е. С.</i>	1346
Разработка технологического процесса электронно-лучевой литографии для изготовления реакционных ячеек оптического одномолекулярного секвенатора ДНК <i>Барбашева А. А., Соловьева А. А., Кугук А. К., Коршаков Н. Д., Муравьева Л. Н., Алибеков Р. Ш., Шувалова А. С., Рыжков В. В., Родионов И. А.</i>	1348
Моделирование неровности края линии в резисте с помощью модели со смешанными параметрами <i>Литаврин М. В., Шарипов А. А., Горнев Е. С.</i>	1350
Определение коэффициента диффузии фотокислоты в химически усиленных фоторезистах <i>Конушкин И. А., Аккуратов А. В., Гапанович М. В.</i>	1352
Разработка фотогенераторов кислоты на основе триарилсульфониевых солей и исследование их свойств <i>Сидельцев М. Е., Лолаева А. В., Кузнецов И. Е., Аккуратов А. В.</i>	1355
Синтез производного норборнендикарбоксимида — перспективного фотогенератора кислоты для химически усиленных фоторезистов <i>Заморецков Д. С., Аккуратов А. В.</i>	1357

Оценки дозовой ошибки литографической установки по наборам функций плотности распределения размера, получаемым при проходе по дозе <i>Балан Н. Н., Васин А. А.</i>	1359
Разработка метода контроля содержания катионов металлов в фоторезистах с химическим усилением, чувствительных к актиничному излучению с длиной волны 248 нм <i>Кузьмина Е. А., Джонс М. М., Шишлянников А. В.</i>	1361
Использование метода двойного экспонирования со сдвигом маски для улучшения разрешающей способности фотолитографического процесса <i>Тихонова Е. Д.</i>	1363
Методы расчета припусков на травление при проектировании фотошаблонов <i>Харченко Е. Л., Уткина А. А.</i>	1365
СЕКЦИЯ №9 «ФИЗИКА МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПРИБОРОВ»	1367
Терагерцевый эмиттер на основе Со/Мо с возможностью управления амплитудой и поворотом поляризации ТГц-излучения <i>Авдеев П. Ю., Лебедева Е. Д., Горбатова А. В., Климов А. А., Гусев Н. С., Буряков А. М., Сапожников М. В., Мишина Е. Д.</i>	1367
Исследование болометрического отклика Ван-дер-Ваальсова сверхпроводника NbSe ₂ <i>Шеин К., Жаркова Е., Кащенко М. А., Любчак А., Нгуен Е., Семенов А., Гольцман Г. Н., Новоселов К. С., Чараев И., Шиллинг А., Гайдученко И., Бандурин Д. А.</i>	1370
Терагерцевая генерация в обменно-смещенной гетероструктуре Со/IrMn <i>Лебедева Е. Д., Авдеев П. Ю., Горбатова А. В., Пашенькин И. Ю., Сапожников М. В., Буряков А. М.</i>	1372
Механизмы радиационной деградации пробивного напряжения р-п-переходов мощных МОП-транзисторов с различными структурами <i>Арзамасцева Д. М., Петров А. С., Таперо К. И.</i>	1374
Диагностика вызванных тяжелыми заряженными частицами повреждений МОП-структур с помощью импедансной и DLTS-спектроскопии <i>Горбачук Н. И., Поклонский Н. А., Ермакова Е. А., Шпаковский С. В.</i>	1377
Способ мониторинга порогового напряжения МОП-транзисторов в широком временном интервале после воздействия импульса ионизирующего излучения <i>Земцов А. Э., Петров А. С., Таперо К. И.</i>	1379
Влияние толщины слоя Hf _{0,5} Zr _{0,5} O ₂ и степени электротренировки на время хранения состояния элемента сегнетоэлектрической памяти <i>Парочкин А. В., Савичев И. А., Савельева Е. О., Чуприк А. А.</i>	1382
Адаптация метода кусочной аппроксимации для оценки времени хранения логических состояний ячеек памяти FeRAM с учетом эффекта импринта <i>Быковский К. С., Захаров П. С., Скворцов Е. Б., Константинов В. С.</i>	1384

Исследование электрофизических параметров памяти EEPROM, изготовленной с использованием импортозамещенных материалов <i>Резник А. А., Морозов Е. Н., Ашанин М. Е.</i>	1386
Элементы энергонезависимой резистивной памяти на основе человеческой крови <i>Клюкина Е. В., Ванькаев А. С., Ковешников С. В.</i>	1388
Исследование газочувствительных характеристик пленок нанокompозитов на основе различных полимерных матриц с добавлением углеродных нанотрубок <i>Горшкова А. С., Павлова А. С.</i>	1390
Исследование процесса генерации тока при деформации легированных азотом углеродных нанотрубок для разработки автономных датчиков деформации <i>Соболева О. И., Ильина М. В., Ильин О. И.</i>	1393
Синтез и функционализация TiS_3 для применения в гибких ИК-детекторах <i>Рымжина А. Р., Павельев В. С., Ph.D Трипати Нишант</i>	1395
Влияние отжига на электрофизические параметры аморфных пленок системы $GeTe-Sb_2Te_3$ <i>Трусов Е. П., Ермачихин А. В., Литвинов В. Г.</i>	1396
Система со взаимодействием Дзялошинского — Мория и SOT-эффектом <i>Турпак А. А., Базров М. А., Кузнецова М. А., Намсараев Ж. Ж., Черноусов Н. Н., Козлов А. Г., Давыденко А. В.</i>	1397
Особенности формирования омического контакта к p^+ -GaAs-базе гетеробиполярного транзистора на основе гетероперехода InGaP/GaAs <i>Захаров С. И., Захарова Н. Ю., Козловский Э. Ю.</i>	1398
Эффект Аронова — Альтшулера — Спивака и характерный размер неоднородностей интерфейса гетероструктур AlGaIn/AlN/GaN <i>Колобкова Е. М., Андреев А. А., Белов И. В., Валеев В. Г., Грищенко Ю. В., Давыдов А. Б., Езубченко И. С., Куликов И. В., Моргун Л. А., Николаев С. Н., Перминов П. А., Черных И. А., Чумаков Н. К., Шабанов С. Ю., Занавескин М. Л.</i>	1399
Исследование процессов многофиламентарного переключения в ячейках RRAM <i>Федотов М. И., Ванькаев А. С., Клюкина Е. В., Ковешников С. В.</i>	1401
Мемристоры на основе HfO_2 и миграции ионов Ag <i>Жидков Н. С., Ханас А. Р., Зенкевич А. В.</i>	1404
Магнитоплазменные колебания в сильноэкранированных прямоугольных двумерных электронных системах <i>Родионов Д. А., Загороднев И. В.</i>	1405
Генерация второй гармоники и широкополосная фотолюминесценция в мезопористых наночастицах Si/SiO_2 <i>Масталиева В. А., Неплох В. В., Айбуш А. В., Макаров С. В., Мухин И. С.</i>	1407



Исследование влияния методов активации на структурные и электродинамические свойства ГКР активной пленки на основе Ag-Nb-N-O для фотонной сенсорики <i>Новиков Д. В., Дубков С. В., Лебедев Е. А., Чумаченко Ю. В., Громов В. Д., Волкова Л. С., Рязанов Р. М.</i>	1410
Разработка системы автоматизированного подсчета полупроводниковых кристаллов VZOR <i>Сухомлинов Р. С., Васильченко Д. В., Ромащенко М. А.</i>	1412
СЕКЦИЯ № 10 «БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»	1415
Макетное моделирование церебральных сосудов с гигантской аневризмой для верификации компьютерной модели оценки необходимости нейрохирургических вмешательств <i>Горина А. В., Галыстов А. А., Ставцев Д. Д., Коновалов А. Н., Гребенев Ф. В., Тельшев Д. В.</i>	1415
Соотношение физиологических характеристик стадий сна между одновременно регистрируемыми ЭЭГ и МЭГ <i>Григорьева О. А., Клеева Д. Ф.</i>	1417
Применение методов глубокого обучения для автоматического обнаружения межсудорожных разрядов на основе фильтров параметрического сопоставления кривых <i>Белокопытов А. С., Клеева Д. Ф., Осадчий А. Е.</i>	1419
Печатные электродные 3D-матрицы для применения в биомедицине <i>Жирнов С. В., Туников Т. А., Киреев А. К., Каршиева С. Ш., Забегалов К. Н., Лагунов В. С., Сенатов Ф. С.</i>	1421
Исследование материалов и технологий нанесения на кожу для улучшения чувствительности и точности углеродных электронных татуировок <i>Касаткина К. А., Мурашко Д. Т., Герасименко А. Ю.</i>	1423
Гибкие сухие электроды на основе углеродных нанотрубок и графена для длительного ЭКГ-мониторинга <i>Куксин А. В., Герасименко А. Ю.</i>	1425
Формирование тонких пленок тензочувствительных сенсоров из электропроводящих углеродных наноструктур с лазерным воздействием для регистрации проявлений синдрома обструктивного апноэ сна <i>Морозова А. С., Пьянов И. В., Герасименко А. Ю.</i>	1427
Нейроинтерфейс, дополненный механотерапией нижних конечностей и чрескожной электростимуляцией спинного мозга <i>Решетникова В. В., Боброва Е. В., Вершинина Е. А., Гришин А. А., Бобров П. Д., Исаев М. Р., Герасименко Ю. П.</i>	1429
Реструктуризация поверхности стимулирующего электрода лазерным излучением <i>Круковский Н. С., Герасименко А. Ю.</i>	1431

Микроэлектронные интерфейсы имплантируемых устройств для стимуляции нервной ткани <i>Кузнецова Е. А., Герасименко А. Ю.</i>	1433
Перспективы применения кольцевого лазерного гироскопа в биомедицинских исследованиях <i>Сметанин И. А., Синельников А. О.</i>	1435
Инвазивная стимуляция периферических нервов как инструмент обратной связи в нейропротезной системе верхней конечности <i>Согоян Г. А., Пилюгин Н. С., Биктимиров А. Р., Синцов М. Ю., Лебедев М. А.</i>	1437
Исследование миоисигналов и разработка системы поддержки движения верхней конечности человека при нарушении проводимости <i>Соколов М. Е., Гончарова А. В., Карнуп Г. А.</i>	1439
Разработка системы для нейромодуляции спинного мозга методом временной интерференции <i>Шалаева И. Г.</i>	1441
Манжета на базе органических полупроводников для оптоэлектронной стимуляции периферических нервов <i>Юсуповская Е. А., Марков А. Г., Коновалов А. Н., Пьявченко Г. А., Тельшев Д. В.</i>	1443
Аппаратно-программный комплекс управления прототипом стимулятора зрительного импланта <i>Белянин Р. И., Савюк В. О., Малето М. И.</i>	1445
Разработка управляющих биоприближенных сигналов экзо-скелета руки методами ИИ <i>Гончарова А. В., Карнуп Г. А.</i>	1447
Разработка электромиографического человеко-машинного интерфейса <i>Гуслянецв Е. Е., Зубков И. С., Герасименко А. Ю.</i>	1449
Предсказание слова при натуралистическом восприятии речи <i>Лехницкая П. А.</i>	1451
Система управления объемным расходом для устройств микрофлюидики <i>Михалин Д. А., Ечеистов В. В., Рыжков В. В., Алибеков Р. Ш., Рыжиков И. А., Родионов И. А.</i>	1452
Композиционный материал для биомедицинской электроники <i>Оцупко Е. П., Савельев М. С., Герасименко А. Ю.</i>	1453
Моделирование и анализ конструкции микрофлюидного чипа <i>Варфоломеева А. А., Паршина С. Р., Пятко Л. А.</i>	1455
Алгоритм обработки цифровых фотографий при визуализации вен в ближнем ИК-диапазоне <i>Ремизов Н. В., Якименко Д. С.</i>	1456
Исследование и разработка датчика секвенирования на базе отечественной КМОП-технологии 180 нм <i>Рожнов Д. А., Калёнов А. Д.</i>	1458

Разработка интероцептивного тренинга с использованием биологической обратной связи <i>Русинова А. В., Аксиотис В. А., Володина М. А., Осадчий А. Е.</i>	1460
Проектирование трехмерных моделей матки и шейки матки на основе данных изображений УЗИ <i>Шалобыта Е. Н., Корнеева И. П.</i>	1462
СЕКЦИЯ № 11 «RISC-V И СИСТЕМНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ»	1464
Анализ портируемости современного ПО для запуска микросервисных приложений и аналитики данных на платформу RISC-V <i>Степина Н. О., Шемаев К. Е., Шеремет С. С., Крючкова К. Ю., Ребдев П. А., Мороз Д. Д., Аверич В. Е., Черепанов Н. И.</i>	1464
Опыт разработки цифровых ИС на основе открытого ПО с использованием отечественных библиотек компонентов <i>Пятак И. М., Антропов В. А., Лешуков Я. А.</i>	1466
Учебный процессор CdM-16 <i>Репин Н. Н., Храповицкий Т. А., Вашурин Д. В., Иртегов Д. В., Власов А. А.</i>	1468
Поддержка запуска ОС Embox в Supervisor-режиме RISC-V <i>Фролов Т. С.</i>	1470
Разработка системы освещения и моторизованного предметного столика для электронного микроскопа с использованием одноплатного компьютера на базе архитектуры RISC-V <i>Симонова Д. В., Шагалова П. А.</i>	1472
Разработка расширения clang-tidy для автоматического преобразования векторных оптимизаций библиотеки OpenCV <i>Голубев Д. Е., Шагалова П. А.</i>	1474
Разработка интеллектуальной системы видеоаналитики на основе платформы RISC-V с использованием SiPeed Lichee Pi 4 <i>Некоркин Д. С., Никоноров С. А.</i>	1476
Оптимизация вычисления формулы Блэка — Шоулза под архитектуру RISC-V <i>Алуттов И. Н., Панова Е. А., Волокитин В. Д., Мееров И. Б.</i>	1478
Оптимизация xxHash для RISC-V с использованием различных реализаций RVV <i>Пономарев Н. А.</i>	1480
Инструмент для оценки BPU <i>Ефремов А. А., Слинчук Д. А.</i>	1482
Образовательное Linux-sarable процессорное ядро RISC-V <i>Примаков Е. В., Силантьев А. М., Кулешов В. К., Протасова Е. А., Гуржов Н. А., Артамонов А. С., Тарасова А. Н.</i>	1483
Использование открытых инструментов для Step-and-Compare-верификации RISC-V-ядер <i>Чусов С. А.</i>	1485

Виртуализация NTB-соединений в QEMU <i>Карасев М. А., Тиняков С. А., Гаврилов А. В., Заславский М. М.</i>	1487
Применение DMA Engine API для разработки драйверов и эмуляция DMA-контроллеров в QEMU <i>Ерхов М. С.</i>	1489
Применение алгоритмов контекстно-свободной достижимости для задач статического анализа кода <i>Кутуев В. А.</i>	1491
Процесс восстановления данных в RAID-1 на основе SPDK <i>Сичкар Г. К., Кононова Ю. А., Васенина А. И.</i>	1493
Генерация модульных тестов, основанных на конфигурации Spring-приложения <i>Шишин К. А., Муравьев И. В., Куликов Е. К.</i>	1495
Анализ системы сборки Yocto Project: устройство кеширования и оптимизация <i>Кондратенко К. Е., Тиняков С. А., Гаврилов А. В., Заславский М. М.</i>	1497
Автоматизированная настройка оптимизирующих компиляторных преобразований с учетом особенностей целевых аппаратных платформ <i>Ефанов Н. Н., Акимов З. Д., Отращенко А. И., Лебедев Г. К., Подлесных Д. А., Белонин В. В.</i>	1499
Исследование способов ускорения работы DMA для периферийных устройств <i>Шиповский В. А., Устюжанина М. А.</i>	1501
Подходы к снижению коллизий маршрутизации в Mesh-сети в вычислительной системе на кристалле с распределенной памятью <i>Хайдуков Д. И., Алексеев А. А.</i>	1503
Методы оптимизации кода для архитектуры «Эльбрус» на примере некоторых функций пакета Larack <i>Карпочев Б. А., Логинов В. Е.</i>	1505
Реализация в бинарном трансляторе x86->e2k уровня системы менеджера загрузки UEFI <i>Худякова Е. В.</i>	1507
Комбинированное устройство термоиндикации на преимущественно отечественной элементной базе для систем холодильных цепей <i>Авдеев П. А., Татаринев Д. И.</i>	1509
Разработка модели когерентного приемника сигналов с линейной модуляцией в среде SystemVue <i>Марков А. С.</i>	1510
Оптимизация сбора траекторного профиля программы методом инструментирования <i>Шампаров В. Е.</i>	1512

СЕКЦИЯ № 12 «МОЛОДЕЖНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ В ОБЛАСТИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ».....	1514
Разработка запоминающих устройств нового поколения на базе сегнетоэлектриков <i>Чуприк А. А.</i>	1514
Принципы работы и возможности технологии аэрозольной печати для создания электронных устройств <i>Ефимов А. А., Лабутов Д. А., Патарашвили А. Н., Масленников Д. В., Арсенов П. В., Иванов В. В.</i>	1516
Фотосенсорика средневолнового ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек <i>Попов В. С.</i>	1518
Самосборка углеводородных молекул для получения новых аллотропов графена <i>Катин К. П., Березницкий И. В., Маслов М. М.</i>	1519
Разработка масштабируемого управляемого автоэмиссионного источника электронов на основе углеродных наноматериалов <i>Сень В. В., Порохов Н. В., Филиппов И. А., Мумляков А. М., Ануфриев Ю. В., Шибалов М. В., Рыков А. С., Анисанов А. А., Красильников М. И., Шевченко А. Р.</i>	1521
О результатах работы лаборатории фоточувствительных и электроактивных материалов по разработке компонентов для химически усиленных фоторезистов. От колбы до реактора <i>Кузнецов И. Е., Заморецков Д. С., Сидельцев М. Е., Новиков А. С., Лолаева А. В., Кузнецова Н. А., Малков Г. В., Аккуратов А. В.</i>	1523
Миниатюризация биомедицинской электроники <i>Пьянов И. В.</i>	1525

УДК 004.056

Перспективные методы исследования и оценки киберустойчивости доверенных ПАК для объектов КИИ

Зегжда Д. П., член-корреспондент РАН, профессор РАН, член-корреспондент Академии криптографии, д. т. н.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
dmitry@ibks.spbstu.ru*

В докладе представлено дальнейшее развитие предложенных ранее формальной постановки задачи и критериев оценки доверенности, сформулированных в терминах энтропийного подхода и теории надежности. Предложены граничные условия завершения испытаний для получения достоверной оценки доверенности ПАК.

Ключевые слова: доверенность; киберустойчивость; оценка доверенности.

Актуальность обеспечения устойчивого функционирования систем критической информационной инфраструктуры (КИИ) обусловлена нестабильными условиями среды и частыми деструктивными информационными воздействиями на систему [1]. Это проявляется как увеличение поверхности атак и расширение множества угроз кибербезопасности. Адекватность (предсказуемость, каузальность) состояний, принимаемых системой КИИ в таких условиях, трактуется как киберустойчивость, задача обеспечения и поддержания которой решается путем импортозамещения и оценки доверенности к электронной и аппаратной компонентой базе [2].

Доклад представляет собой продолжение научного задела, сформированного и представленного в прошлом году на конференции «Микроэлектроника-2023». В рамках доклада выполнено представление критериев доверенности в математические выражения теории надежности, позволяющие описать процесс и результаты взаимодействия с ПАК со стороны программно-информационного воздействия на него. Отмечены перспективные техники анализа доверенности ПАК, включающие фазинг-тестирование и анализ физических характеристик ПАК, сформулированы ключевые положения в части условий завершения тестирования ПАК. Описаны направления дальнейших исследований, расширяющие как спектр исследуемых ПАК, так и возможности по дальнейшему взаимодействию с ними.

Литература

1. Зегжда Д. П., Александрова Е. Б., Калинин М. О. и др. Кибербезопасность цифровой индустрии. Теория и практика функциональной устойчивости к кибератакам. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2021. — 560 с. ISBN 978-5-9912-0827-7. EDN BLBTDA.
2. Захаренков А. И., Бутусов И. В., Романов А. А. Степень доверенности программно-аппаратных средств как показатель качества замещения импорта // Вопросы кибербезопасности, 2017. — № 4. — С. 2–9.

УДК 621.391

Развитие технологий СВЧ электроники в России

Борисов А. А., д. т. н.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

borisov@istokmw.ru

В статье рассматривается необходимый комплекс мероприятий в области развития СВЧ-технологий в России исходя из современного состояния СВЧ электроники в нашей стране в сравнении с мировым уровнем, требований указов президента Российской Федерации в области развития технологий СВЧ электроники, реализуемых в настоящее время, и запланированных мероприятий по развитию научно-технического и производственно-технологического базиса радиоэлектронной СВЧ-отрасли. Рассматриваемый комплекс включает в себя мероприятия по внедрению необходимых технологий, НИОКР по производству требуемой номенклатуры СВЧ-приборов и устройств, развитию существующих и созданию новых производств, оснащению производственных технологических линий необходимым оборудованием и специальными электронными материалами, решению задач кадрового обеспечения.

Ключевые слова: сверхвысокочастотная электроника; технология; развитие; комплекс мероприятий.

Требования к развитию технологий СВЧ электроники в России сформулированы и утверждены Указами Президента Российской Федерации, в том числе от 23 февраля 2017 г. № 91 «Об утверждении Основ государственной политики в области развития оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», от 12 мая 2023 г. № 344 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области развития электронной и радиоэлектронной промышленности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу», от 28 февраля 2024 г. № 145 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года».

Практическая реализация этих требований в среднесрочной и долгосрочной перспективе должна обеспечить технологический суверенитет страны во всех сферах социально-экономического развития, прежде всего в области критической информационной инфраструктуры, обороны и безопасности.

Современное состояние развития СВЧ электроники:

в области электровакуумной СВЧ электроники сохраняется технологический паритет с ведущими мировыми державами, а по отдельным видам ЭВП СВЧ (многочувствительные клистроны, защитные СВЧ-приборы на основе циклотронного резонанса) — Россия определяет мировой уровень. При этом при создании вакуумной техники существует ряд важных материаловедческих, технологических, точностных и других проблем, которые в основе своей не определяются санкционными ограничениями и как правило исторически решались и решаются в настоящее время за счет научно-технического и технологического развития СССР и в последствии Российской Федерации;

в области полупроводниковой СВЧ электроники по изделиям СВЧ на основе арсенида галлия Россия занимает догоняющую позицию по уровню разработок и по отдельным технологиям (рНЕМТ, ДБШ и др.) находится в условном паритете с зарубежными производителями, существенно проигрывая им по уровню объемов производства. В то же время отсутствуют востребованные технологии НВТ, μ НЕМТ. Наиболее существенно отставание в СВЧ технологиях на основе нитрида галлия и кремний-германия. Это прежде всего связано с отсутствием отработанных технологий и устойчивых серийных производств;

в области ферритовых приборов СВЧ технический уровень по электрическим и эксплуатационным характеристикам находится на уровне мировых достижений, уступая по массо-габаритным, энергетическим и стоимостным показателям.

Исходя из анализа технического уровня изделий СВЧ электроники и требований потребителей следует, что в настоящее время требуют развития все технологические направления СВЧ электроники во всех используемых частотных диапазонах. При этом, ускоренного развития требует полупроводниковая СВЧ электроника на основе материалов A^3B^5 и кремний-германия, в первую очередь определяющая создание перспективных радиоэлектронных систем, обеспечивающих оборону и безопасность государства, и аппаратуры, обеспечивающей объекты критической инфраструктуры и другие сферы деятельности.

Обобщенно проблемные вопросы, влияющие на развитие технологий СВЧ электроники, в настоящее время характеризуются:

- отсутствием полнономенклатурных приборных рядов изделий СВЧ электроники, прежде всего в коротковолновой части см- и мм- диапазонов;
- недостаточным доведением до промышленного использования ряда технологий создания изделий полупроводниковой СВЧ электроники (GaAs НВТ, GaN НЕМТ, SiGe BiCMOS);
- отсутствием в России промышленных технологий изготовления СВЧ-приборов на основе гетероструктур нитрида галлия во всех востребованных частотных диапазонах;
- отсутствием в России крупноформатных производственно-технологических комплексов по серийному выпуску изделий СВЧ полупроводниковой электроники (СВЧ-транзисторы и МИС СВЧ) на основе гетероструктур арсенида галлия и нитрида галлия, удовлетворяющего перспективным требованиям растущих объемов потребления;
- проблемами электронного машиностроения и обеспечения требуемыми специальными электронными материалами.

Таким образом, для обеспечения развития технологий СВЧ электроники должны быть решены следующие задачи:

- создание минимально необходимой номенклатуры ЭКБ СВЧ, в том числе обеспечивающей замену ЭКБ СВЧ иностранного производства при разработке и производстве РЭА с параметрами, обеспечивающими сохранение технических, эксплуатационных и массогабаритных характеристик РЭА при замене ЭКБ СВЧ иностранного производства;
- обеспечение серийного выпуска изделий СВЧ электроники в требуемых объемах;
- разработка и доведение до промышленного использования технологий полупроводниковой СВЧ электроники в первую очередь арсенид-галлия

и нитрид-галлия (GaAs pHEMT, GaAs μ HEMT, GaAs HBT, GaN HEMT, SiGe BiCMOS), включая библиотеки элементов и комплексные инструменты проектирования применительно к имеющимся и вновь создаваемым фабрикам;

- развитие отечественного электронного машиностроения для СВЧ отрасли, обеспечения необходимым измерительным и испытательным оборудованием, прежде всего для полупроводниковых СВЧ производств;
- решение задачи обеспечения СВЧ отрасли необходимыми электронными материалами как в номенклатурном и качественном отношении, так и в отношении необходимого количества конструкционных, функциональных и технологических материалов, сырья, полуфабрикатов, сортамента, транспортной и технологической тары, системы инструментального контроля физико-химического состава и пр.;
- формирование научно-технического задела в области СВЧ-электроники;
- кадровое обеспечение отрасли, в том числе в рамках передовых инженерных школ.

Для решения этих задач сформирован и представлен для реализации комплекс необходимых мероприятий.

УДК 004.054

Анализ информационной значимости результатов тестовых испытаний встроенного ПО в доверенных ПАК**Москвин Д. А., к. т. н., Овасапян Т. Д., к. т. н., Грибков Н. А.***Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
moskvin@ibks.spbstu.ru*

В докладе представлен энтропийный подход к оценке результатов испытаний встроенного ПО, направленный на выявление тестовых сценариев, максимально снижающих неопределенность в отношении алгоритмов функционирования ПАК.

Ключевые слова: встроенное программное обеспечение; энтропия; неопределенность; испытания.

В докладе представлен подход к сравнению различных типов испытаний встроенного программного обеспечения (ПО) в доверенных ПАК, где наиболее эффективным является тот эксперимент, результаты которого в наибольшей степени информационно значимы. Подход базируется на проверке энтропийного критерия, который сформулирован следующим образом: встроенное ПО считается допустимо доверенным, если в результате проведения над ним ряда экспериментов наблюдается снижение уровня энтропии (неопределенности) состояний исследуемого ПО до некоторого допустимого.

При проведении испытаний уровень неопределенности снижается неравномерно: на большую или меньшую величину, сразу либо по прошествии некоторого времени. Результатом эксперимента может быть увеличение числа выходных состояний, доступного исследователю, за счет получения новых знаний о работе программы (наличие недокументированных возможностей, передача данных на удаленный сервер и т. п.), что также увеличивает энтропию.

Представлено сравнение распространенных подходов к тестированию ПО и результаты эксперимента по определению оптимальных испытаний на основе предложенного подхода к оценке их информационной значимости. Дополнительно показано, что за счет исключения фрагментов программного кода с высоким уровнем доверия удалось снизить объем кода, который необходимо анализировать в дальнейшем.

Литература

1. Yang L. et al. Entropy and software systems: towards an information-theoretic foundation of software testing // Proceedings of the FSE/SDP workshop on Future of software engineering research, 2010. P. 427–432.
2. Villasenor C. et al. Germinal center optimization algorithm // International Journal of Computational Intelligence Systems, 2018. Vol. 12. № 1. P. 13–27.
3. Gribkov N.A., Ovasapyan T.D., Moskvina D.A. Analysis of Decompiled Program Code Using Abstract Syntax Trees // Automatic Control and Computer Sciences, 2023. Vol. 57. № 8. P. 958–967.

УДК 621.3.049

Комплексированная навигационная система услуг локации КОНСУЛ — подсистема локальной навигации

Корнеев И. Л., к. т. н., Александров А. В., Кузнецов А. С., Прасолов В. Ф.

АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

i.korneev@i-progress.tech, a.alexandrov@i-progress.tech,

a.kuznetsov@i-progress.tech, v.prasolov@i-progress.tech

Приведены архитектура КОНСУЛ, состав системы и услуги локации. Приведены принципы построения локальной системы навигации на отечественных СБИС. Описаны основные процедуры цифровой обработки сигналов в ЛСН, методы повышения помехоустойчивости и точности позиционирования. Приведены результаты моделирования и натурных испытаний системы.

Ключевые слова: локальная система навигации; фильтр Найквиста; функция корреляции; псевдослучайная последовательность; фильтр Калмана.

КОНСУЛ — комплексированная навигационная система услуг локации, обеспечивающая потребителя определение местоположение с нужными потребительскими параметрами (точность, доступность, целостность, конфиденциальность, помехоустойчивость).

Система КОНСУЛ объединяет в своем составе:

- прием и обработку сигналов ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo) и функциональные дополнений- RTK, PPP;
- формирование, прием и обработку сигналов не спутниковой радионавигационной системы (локальная система навигации) АО «НИИМА «Прогресс»;
- формирование, прием и обработку сигналов для позиционирования в помещении BLE, WiFi-RTT;

Представлена архитектура РЭА КОНСУЛ (рис. 1).

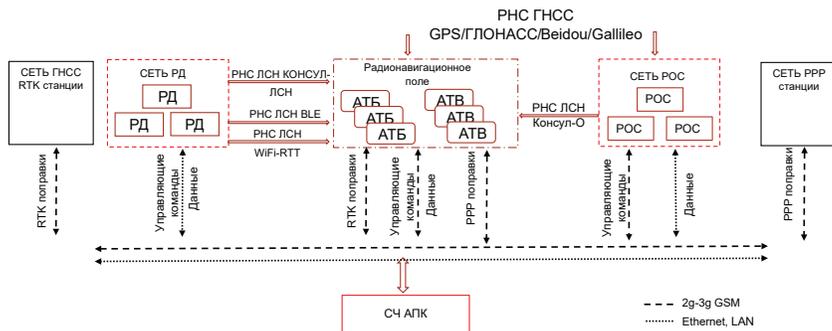


Рис. 1. Архитектура РЭА КОНСУЛ

В состав РЭА КОНСУЛ входят: радионавигационные опорные станции (РОС); радионавигационные датчики (РД); абонентские терминалы базовые (АТБ); абонентские терминалы высокоточные (АТВ). составная часть аппаратно- программного комплекса (СЧ АПК).

Приведены основные характеристики составных частей РЭА КОНСУЛ.

Представлены услуги локации:

ГНСС стандартной точности; ГНСС повышенной точности RTK, PPP; ЛСН; Indoor позиционирования (в помещении) BLE, Wi-Fi -RTT;

Особенности проекта КОНСУЛ:

- создается помехоустойчивая, высокоточная система, решающая задачу позиционирования и мониторинга объектов в отсутствие сигналов ГНСС;
- используется навигационный сигнал, свободный от воздействия ионосферы и погрешности определения эфемерид спутников;
- обеспечивается повышенная точность позиционирования с использованием оригинального алгоритма корреляционной обработки кода сигнала в согласованном фильтре [1];
- обеспечивается устойчивость к генерируемым имитационным помехам (100%) с использованием множества динамически изменяемых псевдослучайных последовательностей (ПСП) [2];
- обеспечивается устойчивость к маскирующим помехам с использованием шумоподобного сигнала, обеспечивающего подавление помехи на выходе корреляторов по мощности V раз, где $V = 1024$ -база сигнала [5].

Сигналы и режимы локальной системы навигации [2]

В системе используется шумоподобный сигнал с базой 1024 (более 1000 ПСП), с частотой следования символов 1 МГц, с модуляцией BPSK, с временным и частотным разделением каналов [5].

Для развертывания сети абонентские терминалы взаимодействуют с шестью радионавигационными опорными станциями.

Частотное разделение каналов.

Несущие частоты станций РОС разнесены на 2,7 МГц. При этом используются 3-канальные приемо-передатчики, настроенные на три несущих частоты.

Временное разделение каналов.

РОС излучают радионавигационный сигнал двумя тройками, разделенными по времени.

Представлен канал приемо-передатчика ЛСН на базе специализированных отечественных СБИС К1917BC024 и К5200MX014 с АФУ на рис. 2 [3]:

Показано, что в приемо-передающем модуле сигнал проходит через фильтр Найквиста 65 порядка с АЧХ — приподнятый косинус для сужения полосы сигнала до 1,4 МГц с полным подавлением боковых лепестков.

Обработка сигнала перед ЦАП и после АЦП ведется на частоте 20 МГц для того, чтобы отодвинуть кратную полосу пропускания цифрового фильтра и использовать простой антиалиазинговый аналоговый фильтр с пологой АЧХ (ФНЧ I, ФНЧ Q) для подавления частот M^*fd .

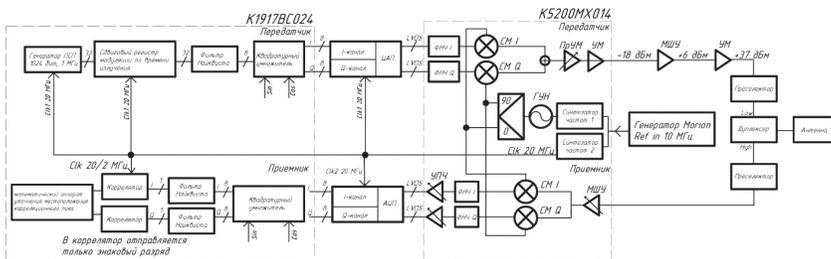


Рис. 2. Канал приемо-передатчика ЛСН

Предложено повышение точности позиционирования путем повышения частоты дискретизации входного сигнала в приемнике ЛСН в 10 раз путем сдвига тактирующего сигнала в АЦП и корреляторах последовательно на каждой из 10 посылок ПСП. Правильный тактовый сигнал — ближайший к переднему фронту информационного импульса (не к середине информационного импульса, как в системах связи). При этом первый по времени пик функции корреляции соответствует правильному расположению тактового сигнала 20 МГц и результирующая частота отсчетов на выходе АЦП и в корреляторах будет аналогична частоте 200 МГц,

Приведены отсчеты сигнала, шума и корреляционные функции при сигнал/шум = 0,3 и сигнал/шум = 0,1.

Приведена нижняя оценка инструментальной ошибки позиционирования (без учета внешних влияний и геометрии), где $c = 2,997 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в среде:

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{c\sqrt{2}}{f_{\text{симв.}} \cdot K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K4} = \frac{2,997 \cdot 10^8 \cdot 1,414 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 5} = 0,14 \text{ м}$$

Инструментальная ошибка синхронизации сети опорных станций [3]

В процессе синхронизации ведущая РОС посылает сигнал с эталонного генератора, содержащий 25 ПСП, принимаемый ведомыми РОС.

При приеме сигнала получается инструментальная ошибка (СКО) вычисления псевдодальности между станциями $\sigma_{\text{п}} = 0,1$ м, которая пересчитывается в ошибку синхронизации во времени: $\sigma_{\text{синхр}} = \sigma_{\text{п}}/c = 0,4$ нс, где $c = 2,997 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в среде.

Что сопоставимо с точностью синхронизации системы LocataNet (1 нс).

Для генераторов в РОС с нестабильностью частоты $\Delta f/f = 2 \cdot 10^{-12}$ за 1 сек. для обеспечения $\sigma_{\text{синхр}} = 1$ нс процедура должна повторяться каждые 500 сек.

Общая СКО позиционирования с учетом синхронизации составит: $\sigma_{\text{общ}} = \sqrt{\sigma_{\text{п}}^2 + \sigma_{\text{синхр}}^2} = n \cdot \sqrt{2} = 0,25$ м

Передача информации в навигационном сигнале

Показана структура кадра в ЛСН и временная диаграмма излучения навигационных сообщений в ячейке ЛСН из шести РОС. Целый кадр, за который передается вся неоперативная информация (координаты, климатические измерения, текущие невязки шкалы времени и проч...) от всех РОС составляет 1 секунду.

Особенности и принципы развертывания ЛСН вне периметра сети РОС

Рассмотрена сеть РОС, в которой дальность до объекта 100 км обеспечивается тем, что БПЛА находятся на высоте около $H_1 = 2000$ м, а антенны РОС подняты на высоту $h_2 = 30$ м.

Так как сеть РОС развернута на плоскости, для улучшения геометрического фактора VDOP (по высоте), одна из РОС поднята на высоту 20 км.

Диаграмма направленности приемной антенны БПЛА представляет собой две полусферы. Чтобы не попасть в 0 диаграммы направленности антенны, БПЛА должен находиться в стороне от центра сети РОС.

Показан случай, когда на БПЛА воздействует источник помехи, расположенный на расстоянии 10 км.

В этом случае если мощность сигнала передатчика $P_c = 10$ Вт, то для подавления сигнала мощность помехи должна быть $P_p = 316$ Вт (при уровнях с/ш = 0,1 на входе корреляторов).

Обеспечение точности позиционирования движущихся объектов в динамике путем комплексирования ЛСН с инерциальной навигационной системой (ИНС) [4]

Из-за низкой частоты обновления ГНСС и ЛСН невозможно обеспечить точное позиционирование движущихся объектов в реальном времени. Отсюда необходимость использования инерциальных датчиков (ИД).

Инерциальный датчик — это высокочастотный (до 1 кГц) датчик, который обнаруживает ускорение и вращательное движение. Но сам инерциальный датчик также имеет проблемы, такие как отклонение и шум, влияющие на результаты, но при этом ЛСН будет корректировать его показания с использованием фильтра Калмана.

Навигационное ПО — модуль позиционирования Radar5

Представлен расширенный Фильтр Калмана (РФК) с динамической моделью Зингера (второго порядка) для решения кинематической задачи позиционирования на основе мультилатерации, т.е. разностей времен получения сигнала по часам приемника и излучения сигнала по часам нескольких передатчиков, имеющих известные координаты.

Результаты натурных испытаний системы

Натурные испытания системы ЛСН были проведены в пойме реки Яхромы. Были развернуты четыре опорные станции РОС. Приведены треки точного приемника ГНСС и АТБ ЛСН, полученные на испытаниях.

Показано, что фильтр Калмана эффективно сглаживает случайные выбросы. *Оценка разности треков ГНСС и ЛСН: в статике СКО = 0,3 м, в динамике СКО = 2,1 м*

Новизна полученных результатов проекта КОНСУЛ

Существующие отечественные локальные радионавигационные системы высокой точности и зарубежная система UHRS (Locata) не обладают высокой помехоустойчивостью.

В подтверждение новизны результатов поданы 10 заявок и уже получены три патента на изобретения.

Преимущества ЛСН проекта КОНСУЛ

- измерение дальности в ЛСН основано не на измерении фазы несущей, подверженной воздействию помех, а на точном определении момента пика функции корреляции при обработке кода сигнала;
- ЛСН обеспечивает защиту от «спуфинга» за счет использования множества ПСП и сложного закона их смены, а также использования мер борьбы с переотражениями;
- ЛСН превосходит систему UHRS по помехоустойчивости, а eLoran и STOIC по точности;
- ЛСН, комплексированная с ИНС и баровысотомером, позволит использовать систему для обеспечения высокоточной навигацией роботов и беспилотных транспортных средств в отсутствии сигналов ГНСС.

Литература

1. Korneyev I. Integral Robot Technologies and Speech Behavior. Chapter Twelve. Design of Matched Filters for Equipment of Navigation, Communication and Radars: Task Decomposition of Correlation and Convolution Computation in ASICS. Cambridge Scholars Publishing, 2023. P. 332–350.
2. Корнеев И. Л., Егоров В. В. Задачи практического применения локальной системы навигации // Наноиндустрия, 2020. Спецвыпуск (96). — С. 12–17.
3. Корнеев И. Л., Кузнецов А. С., Королев В. С. Режимы работы локальной системы навигации в проекте КОНСУЛ. Потребители системы КОНСУЛ // Наноиндустрия, 2021. Спецвыпуск (7s). — Т. 14 (107). — С. 57–59.
4. Кондрашов З. К., Корнеев И. Л. Обеспечение телематики и навигации автономного транспорта и роботов в развитие технологического суверенитета радиоэлектроники Российской Федерации. Использование локальной системы навигации, комплексированной с инерциальной навигационной системой // Наноиндустрия, 2023. Спецвыпуск (9s). — Т. 16 (119). — С. 10–18.
5. Пестряков В. Б. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. — М.: Советское радио, 1973. — 424 с.

УДК 621.38

Тенденции развития элементной базы аппаратуры ЦОС космического назначения

Стещенко В. Б., к. т. н., доцент

Заместитель генерального конструктора

АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»

111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

contact@spacecorp.ru

Электронная компонентная база, применяемая в бортовой аппаратуре КА, должна в полной мере обеспечивать целевые технические характеристики радиоэлектронной аппаратуры в части функциональных и электрических параметров, а также стойкость к внешним воздействующим факторам. В докладе проведен анализ истории развития и текущей ситуации электронных компонентов для применения в бортовых системах обработки сигналов. Рассмотрена дорожная карта развития элементной базы на среднесрочную перспективу. Сформулированы требования к характеристикам элементов. Рассмотрены вопросы обеспечения качества и надежности.

УДК 53.082.534

На пути создания нового поколения миниатюрных квантовых стандартов частоты микроволнового и оптического диапазонов

Бражников Д. В.^{1,2}, к. ф.-м. н., Михайлов А. М.^{1,2}, Игнатович С. М.¹,
Месензова И. С.¹, к. ф.-м. н., Вишняков В. И.¹, Скворцов М. Н.¹, д. ф.-м. н.

¹ Институт лазерной физики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15Б

x-kyant@mail.ru

² Новосибирский государственный университет

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Исследованы новые методы возбуждения нелинейных резонансов в парах щелочных металлах в виде узкого нелинейного резонанса, нашло важные применения в квантовой метрологии для создания квантовых стандартов частоты оптического и микроволнового диапазонов с долговременной стабильностью лучше, чем 10^{-12} .

Ключевые слова: квантовые стандарты частоты; диодные лазеры; субдоплеровская спектроскопия; когерентное пленение населенностей.

Явление когерентного пленения населенностей (КПН), наблюдаемое в парах щелочных металлах в виде узкого нелинейного резонанса, нашло важные применения в квантовой метрологии для создания квантовых стандартов частоты (КСЧ). Миниатюрные КСЧ микроволнового диапазона на основе КПН (атомные часы) представляют большой интерес для развития систем навигации и связи. Передовые образцы таких устройств демонстрируют стабильность частоты около $3 \cdot 10^{-11}$ за 1 с усреднения и 10^{-12} за 24 ч [1]. При этом они обладают малыми габаритами ($V < 100 \text{ см}^3$) и энергопотреблением ($P < 1 \text{ Вт}$). Большую практическую важность представляет дальнейшее улучшение стабильности КСЧ/КПН.

В стандартной схеме миниатюрных КСЧ/КПН используется один много-частотный циркулярно поляризованный пучок, создаваемый диодным лазером. Мы развили другой подход, основанный на использовании двух таких пучков с противоположными круговыми поляризациями. Уже известно, что в такой схеме резонансы КПН обладают большим контрастом [2], что улучшает кратковременную стабильность КСЧ. Такой подход уже был успешно протестирован в миниатюрном исполнении [3]. В нашем случае предлагается регистрировать прохождение через ячейку с атомами не двух пучком, как в других работах, а лишь одного из них. В таком случае частота выходного сигнала КСЧ/КПН может обладать в разы большей стабильностью.

В последние годы намечилось новое направление в квантовой метрологии — миниатюрные КСЧ оптического диапазона. Коллективом NIST (США) на основе двухфотонной спектроскопии ^{87}Rb был создан оптический КСЧ объемом всего 35 см^3 и стабильностью $\approx 3 \cdot 10^{-12}$ за 1 с [4]. Мы предлагаем альтернативный подход — двухчастотная субдоплеровская спектроскопия атомов Cs. Предварительные измерения, проведенные с помощью микроячейки с атомами ($V \approx 5 \text{ мм}^3$), демонстрируют стабильность оптической частоты, равную $1 \cdot 10^{-12}$ за 1 с [5]. Перенос стабильности в радиодиапазон может быть осуществлен с помощью микрорезонаторов [6]. Это открывает большие перспективы предложенного метода в квантовой метрологии.

Работы выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00279).

Литература

1. Скворцов М. Н. и др. Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населенностей в парах атомов ^{87}Rb // Квантовая электроника, 2020. — Т. 50. — № 6. — С. 576.
2. Kargapoltsev S. V. et al. High-contrast dark resonance in $\sigma_+ - \sigma_-$ optical field // Laser Physics Letters, 2004. Vol. 1. P. 495.
3. Shah V. et al. Compact phase delay technique for increasing the amplitude of coherent population trapping resonances in open Λ systems // Optics Letters, 2006. Vol. 31. P. 2335.
4. Maurice V. et al. Miniaturized optical frequency reference for next-generation portable optical clocks // Optics Express, 2020. Vol. 28. № 17. P. 24708.
5. Gusching A. et al. Short-term stability of Cs microcell-stabilized lasers using dual-frequency sub-Doppler spectroscopy // J. Opt. Soc. Am. B, 2021. Vol. 38. № 11. P. 3254.
6. Newman Z. L. et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock // Optica, 2019. Vol. 6. № 5. P. 680.

УДК 621.391.26

Методы повышения помехоустойчивости локальных систем навигации в условиях воздействия оптимизированных помех

Глушанков Е. И., Кирик Д. И., Кондрашов З. К.

АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

На основе обобщенной модели взаимодействия антагонистических систем рассмотрена игровая задача обеспечения гарантированной помехоустойчивости локальных систем навигации (ЛНС) в условиях воздействия оптимизированных помех. При этом задача ЛНС состоит в обеспечении требуемой точности навигации, а задача системы радиоподавления в подавлении максимально возможного числа навигационных станций при ограниченной средней мощности. Осуществляется решение сформулированной игровой задачи и предложены методы повышения помехоустойчивости при оптимизированном радиоподавлении.

Ключевые слова: локальные системы навигации; оптимизированные помехи; точность; радиоподавление; помехоустойчивость.

Большинство известных алгоритмов позиционирования в ЛНС предназначены для функционирования в условиях стационарных (в широком смысле по пространственным и временным параметрам) помех. Поэтому при воздействии нестационарных (например импульсных, «мерцающих» и др.) помех эффективность позиционирования резко снижается [1, 2]. В то же время зачастую отсутствуют точные априорные сведения о характере действующих на радионавигационную систему помех. Цель работы — оценить потенциальную (гарантированную) помехоустойчивость навигационных систем при наихудших помехах, что характерно для конфликтных условий взаимодействия навигационной системы и источника помех, и предложить методы повышения помехоустойчивости ЛНС при оптимизированном радиоподавлении.

Постановку игровых задач позиционирования в конфликтных условиях рассмотрим на модели взаимодействия системы радионавигации и источника помех (ИП) на основе конфигурации, предложенной в [3] с учетом конечной инерционности каналов наблюдения, управления, разведки и подавления. На основе такой модели сформулирована задача в виде игры

$$\Gamma = \langle W, X, I \rangle, \quad (1)$$

где W — множество стратегий СУ; X — множество стратегий ИП; I — цена игры.

Представлены решения игры (1) в чистых и смешанных стратегиях, позволяющие определить показатели помехоустойчивости и точности позиционирования ЛНС при оптимизированном радиоподавлении и предложить методы повышения помехоустойчивости ЛНС.

Литература

1. Анашкин Р. В., Глушанков Е. И., Колосов Л. В., Яцук В. В. Использование специальной фазовой модуляции сигналов в конфликтных условиях решения задач помехозащиты и создания помех // Радиотехника и электроника, 1991. — Т. 36. — № 10. — С. 1968–1975.
2. Глушанков Е. И., Зимарин В. И., Мисюра В. Р., Родимов В. А. Пространственно-временная обработка сигналов в конфликтных условиях // Пространственно-временная обработка сигналов в системах радиосвязи. — Приложение к журналу «Радиотехника». — Москва, 1992. — С. 34–36.
3. Чуднов А. М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем. — СПб: ВАС, 2021. — 192 с.

УДК 627.712.63

Результаты разработки линейки навигационно-связных модулей и перспективы развития новых

Чикваркин И. Б., Потанов И. В.

АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

info@i-progress.tech

Приведено описание и состав навигационно-связных модулей, разработанных в рамках НИОКР. Отражены результаты испытаний в составе станций и в условиях реальных сигналов. Отражен вопрос о детектировании внешних помех на модули ГНСС и GSM. Рассмотрены вопросы и проблемы при проектировании отдельных модулей. Отражены перспективы дальнейшего развития новых навигационно-связных модулей.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС); Модули связи GSM; Модули связи LTE; модуль навигации; терминал ЭРА-ГЛОНАСС; трекер; аппаратура спутниковой навигации; электронное средство индивидуальной мобильности (ЭСИМ).

В докладе обозначена проблема разработки линейки перспективных навигационно-связных модулей GSM, таких как «Модуль 2G», «Модуль 4G», «Модуль BT 5.0», «Модуль Wi-Fi+BT», «Модуль 2G+GNSS+BT», «Модуль 4G+GNSS» и их различных модификаций — вариантов исполнения. Доложено о завершении этапа разработки, испытаний и выпуска опытной серии по каждому модулю. Озвучена проблематика проектирования, изготовления опытных образцов и испытаний. Указаны потребности по модулям в виде сводного анализа.

Представлена структурная схема «Модуль 2G», «Модуль 4G», «Модуль BT 5.0», «Модуль Wi-Fi+BT», «Модуль 2G+GNSS+BT», «Модуль 4G+GNSS» и их варианты исполнения:

- навигационный модуль;
- модуль приема-передающий GSM/LTE;
- модуль связи Wi-Fi;
- модуль связи Bluetooth.

Модули позволяют охватить различные ниши от автопрома (трекеры, терминалы ЭРА-ГЛОНАСС, модули связи и навигации бортовых компьютеров) до сельского хозяйства и привычных для многих кассовых терминалов.

Одним из важнейших вопросов является детектирование направленных помех на модули ГНСС и GSM. С проблематикой данных вопросов сталкиваются разработчики аппаратуры и модулей, занимаясь разработками для разных потребителей.

Дальнейшее развитие модулей в части NB-IoT, Wi-Fi и BT последних поколений, а так же общение аппаратуры между собой (V2X/C-V2X) становится одной из передовых задач нашего времени. Передача большого количества данных влечет за собой построение инфраструктуры частных сетей 5G, а это за собой и абонентских терминалов и модулей на их основе.

Таким образом, навигационные, связные и навигационно-связные модули могут применяться во всех направлениях, где возникает потребность определения местоположения и передачи данных.

Литература

1. Корнеев И. Л., Чикваркин И. Б., Кузнецов А. С., Егоров В. В., Дубинко Т. Ю. Отечественные навигационно-связные модули: разработка нового поколения на основе отечественной ЭКБ. 5-я Международная конференция «Электронная компонентная база и электронные модули». Сборник тезисов. Алушта, октябрь 2019 г. — М.: ТЕХНОСФЕРА.

УДК 627.71

Всеполосный высокоточный навигационный антенный модуль

Медведев И. А., Бойко С. Н., Трухачев И. М.

АО «Научно-исследовательский институт космического приборостроения»

111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

medvedev_ia@orkkniikp.ru, boyko_sn@orkkniikp.ru, trukhachev_im@orkkniikp.ru

Введение

В настоящее время навигационное оборудование используется практически во всех сферах жизнедеятельности человека для решения целого ряда задач, связанных с определением местоположения какого-либо объекта. Одним из основных функциональных узлов навигационной аппаратуры потребителя является антенный модуль — устройство, осуществляющее прием навигационного сигнала, первичное усиление и фильтрацию внеполосных помех. К антенному модулю в составе высокоточной навигационной аппаратуры предъявляются следующие требования:

- высокий уровень отношения сигнал/шум на входе навигационного приемника (обеспечивается высоким коэффициентом усиления антенного элемента и низким коэффициентом шума маломощного усилителя);
- высокая стабильность фазового центра антенного элемента (обеспечивается выбором конфигурации антенного элемента и способом его питания);
- подавление сигналов, отраженных от земной поверхности (обеспечивается выбором конфигурации антенного элемента и установкой дополнительных экранов для минимизации коэффициента усиления в нижней полусфере).

Также для повышения точности необходимо задействовать максимальное количество частотных диапазонов (GLONASS/GPS L1, L2, L3, L5).

В данном сообщении описан процесс проектирования всеполосного высокоточного антенного модуля и приведены технические решения, использованные для улучшения его точностных характеристик, а именно:

- широкополосный антенный элемент с круговой поляризацией и стабильным фазовым центром;
- экран отсеки обратного излучения на основе микрополоскового эллиптического НЧ-фильтра;
- маломощный усилитель с низким коэффициентом шума.

В навигационных антенных модулях как правило используются микрополосковые антенны плоскостного [1] или этажерочного [2] типа с полусферической диаграммой направленности.

Экраны отсеки обратного излучения для использования в навигационной аппаратуре потребителя делятся на несколько типов: классические «Чок-ринги» (англ. «Choke-Ring») [3], вертикальные «Чок-ринги» [4], высокоимпедансные частотно-селективные поверхности («Electromagnetic band gap», сокр. EGB-структуры) [5]. Классические «чок-ринги» обеспечивают максимальный уровень отсеки обратного излучения, но отличаются большой массой, большими габаритами, а также технологическими сложностями при изготовлении многодиапазонных вариантов. Вертикальные «чок-ринги» компактнее и легче, однако обеспечивают

меньший уровень отсечки обратного излучения и имеют те же технологические сложности при изготовлении, что и классический вариант. Высокоимпедансные частотно-селективные структуры обеспечивают сопоставимый с классическими «чок-рингами» уровень отсечки обратного излучения, обладая при этом наилучшими массогабаритными характеристиками. При этом сложность их изготовления варьируется от крайне высокой до крайне низкой, в зависимости от выбранной конфигурации экрана.

Плата МШУ должна обеспечивать питание соответствующего количества портов антенного элемента с учетом требуемого фазирования точек питания, обеспечивать низкий коэффициент шума, необходимое усиление в рабочих диапазонах частот и фильтрацию внеполосных помех. Фазирование точек питания в широкой полосе частот осуществляется схемой питания, построенной на основе направленных ответвителей. Основное влияние на коэффициент шума МШУ оказывает часть схемы, расположенная до усилителя первого каскада, а также же коэффициент шума самого усилителя первого каскада. Таким образом, для уменьшения коэффициента шума МШУ необходимо минимизировать потери в части схемы до усилителя первого каскада, а также использовать в качестве усилителя первого каскада малощумящий усилитель с низким коэффициентом шума.

Проектирование

Антенный элемент в составе опытного образца антенного модуля представляет собой широкополосную микрополосковую антенну с многослойной подложкой (см. рис. 1). Для расширения полосы и улучшения стабильности фазового центра антенного элемента была реализована система распределенной запитки с помощью четырех треугольных зондов, размещенных между топологией и экраном [6]. Сигналы на зонды поступают с разностью фаз в 90° , после чего суммируются соответствующим образом на плате МШУ.

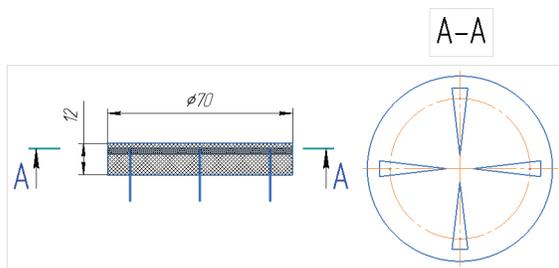


Рис. 1

В рамках проектирования антенного модуля предложен оригинальный экран, относящийся к типу высокоимпедансных частотно-селективных поверхностей. Частотно-селективная структура выполнена в виде микрополоскового эллиптического НЧ-фильтра. В ходе разработки был выбран фильтр-прототип (см. рис. 2) [7], проведен теоретический расчет сосредоточенных значений электрической схемы данного фильтра, была рассчитана топология для реализации данного фильтра (см. рис. 3), проведено моделирование рассчитанной топологии, после чего

изготовлен макет экрана отсечки обратного излучения (см. рис. 4). АЧХ макета представлена на рис. 5.

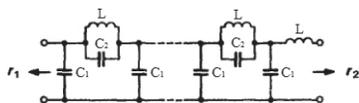


Рис. 2

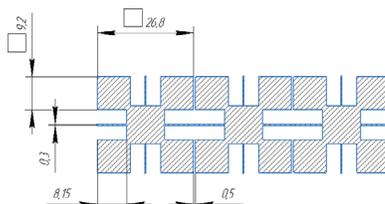


Рис. 3

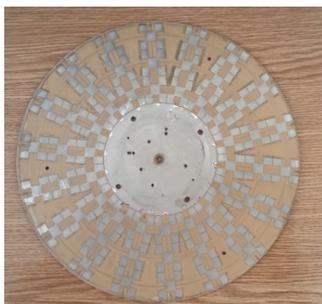


Рис. 4



Рис. 5

Плата МШУ для опытного образца антенного модуля обеспечивает сложение сигналов с четырех точек питания с учетом разности фаз 90° между ними, частотное разделение сигнала на два канала с помощью дуплексера на основе керамических полосовых СВЧ-фильтров с низкими потерями, раздельное усиление, дополнительную фильтрацию с помощью ПАВ-фильтров с высокой избирательностью и суммирование сигналов.

На основании данных наработок был изготовлен опытный образец антенного модуля с экраном отсечки обратного излучения (см рис. 6). На рис. 7 представлены частотные зависимости коэффициента усиления, на рис. 8 — КСВн антенного элемента с учетом экрана отсечки обратного излучения и схемы питания.

На рис. 9 представлена ненормированная АЧХ опытного образца антенного модуля. На рис. 10 представлены диаграммы направленности антенного модуля для правой и левой поляризации измерительной антенны.



Рис. 6

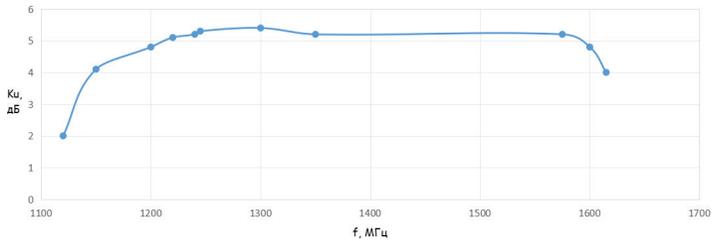


Рис. 7

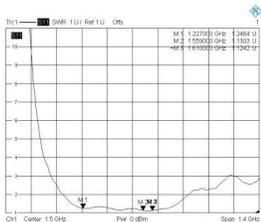


Рис. 8

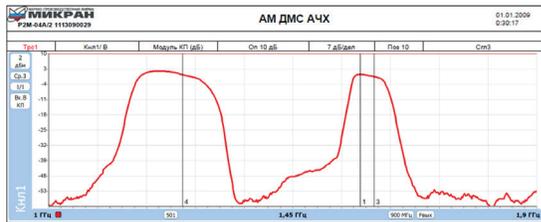


Рис. 9

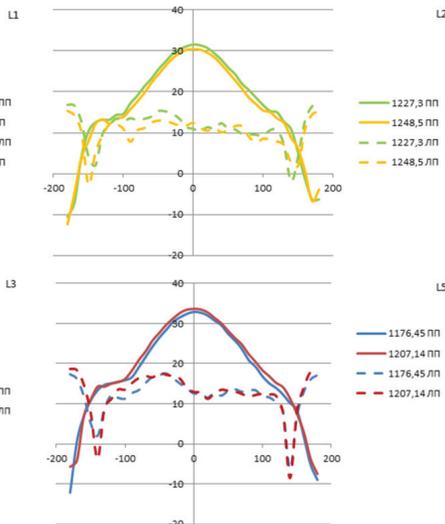
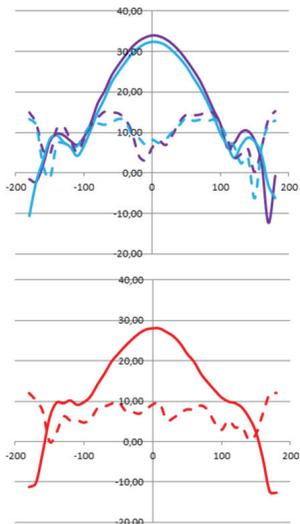


Рис. 10

Новизна результатов

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- разработан широкополосный антенный элемент с 4-точечной системой питания с малыми потерями для минимизации коэффициента шума МШУ;
- разработан оригинальный экран отсеки обратного излучения на основе высокоимпедансной частотно-селективной поверхности;
- разработан и изготовлен опытный образец антенного модуля на основании вышеперечисленных технических решений.

Заключение

Предложен вариант построения антенного модуля для навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС/GPS L1, L2, L3, L5. Для данного модуля разработан широкополосный антенный элемент, оригинальный экран отсеки обратного излучения и малошумящий усилитель с интегрированной схемой питания антенного элемента. Изготовлен опытный образец антенного модуля. По результатам измерений коэффициент усиления антенного элемента составляет не менее +4 дБ в диапазоне L1, не менее +4,5 дБ в диапазоне L2, не менее +3 дБ в диапазоне L3, не менее +5 дБ в диапазоне L5. Уровень отсеки обратного излучения достигает –35 дБ. СКО отклонения фазового центра, полученное в ходе оценочных измерений с помощью навигационного приемника NOVATEL OEM719, не превышает 3 мм. Таким образом, данный антенный модуль пригоден для использования в составе навигационной аппаратуры потребителя, в том числе и геодезического класса.

Литература

1. Бойко С. Н., Исаев А. В., Марьянов В. Б. Малогабаритный двухдиапазонный антенный модуль для приемников глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Радиотехника и электроника, 2020. — Т. 65. — № 6. — С. 551–558.
2. Бойко С. Н., Исаев А. В., Марьянов В. Б., Трухачев И. М. Микрополосковая антенна ГНСС этажерочного типа с встречным питанием антенных элементов // Антенны, 2020. — № 2 (264). — С. 29–40.
3. Kunysz W. A three dimensional choke ring ground plane antenna, proceeding of ION. September 2003.
4. Бойко С. Н., Кухаренко А. С., Яскин Ю. С. Применение экрана на основе метаматериала для отсеки многолучевости антенн спутниковых систем навигации // Антенны, 2015. — № 7. — С. 63–69.
5. Bao L., Ruvio G., Amman M.J., John M. High performance circularity polarized antenna on fractal EBG structure, 2006. Vol. 5.
6. Tamjid F., Foroughian F., Thomas C. M., Ghahremani A., Kazemi R., Fathy A. E. Toward High-Performance Wideband GNSS Antennas-Design Tradeoffs and Development of Wideband Feed Network Structure// IEEE Transactions on antennas and propagation, 2020. Vol. 68. № 8. P. 5796–5806.
7. Зааль Р. Справочник по расчету фильтров // Радио и связь, 1983.

УДК 621.3.049

Интегральный СШП-СКИ трансивер

Маниленко И. Н. к. т. н., Каличкин С. В.

- Начало работ в СССР, Разработки в области Импульсного Радио начались в 70-х. Первоначально импульсная локация была применена для измерения с самолета толщины льда на водоемах.
- Основоположник современной UWB-связи Ларри Фулerton — первый патент по UWB-связи. Его компания — Time Domain(TDC) основана 1987 году.
- ~2000 год — выход первого чипсета от TDC — технология 125 нм, кремний-германий Pulson100. Интегральная реализация UWB-радиоканала.
- Проблема совместимости с узкополосными каналами. Введение частотной маски (ограничения по мощности на разных частотах в диапазоне 3–10,7 ГГц) некоторые другие ограничения.
- Введение стандарта — IEEE 802.15.4, в рамках которого допустимо коммерческое использование СШП-связи при исполнении требований Национальной частотной маски.
- Сверхширокополосная связь на сверхкоротких импульсах (СШП-СКИ) развивается с момента появления технологии 125 нм Германий Кремний в 2000 году и обладает рядом достоинств:
 - скрытность — работа под шумами — главное достоинство;
 - компактность — габариты определяет размер антенны;
 - низкая цена — определяется ценой обычной заказной ИС;
 - высокая скорость передачи данных — ожидается более 10 Мб в секунду;
 - возможность работы при активных помехах;
 - высокая скорость передачи данных на единицу излученной мощности;
 - возможность локального позиционирования в зоне работы нескольких передатчиков.
- Если реализовать такой набор свойств в виде заказной ИС, то становится возможным построить широкий круг изделий, как-то:
 - скрытная тактическая связь;
 - передача видеосигнала с БЛА в формате HD;
 - радиокомандное управление;
 - комбинированное управление с учетом возможности позиционирования;
 - программирование снарядов вдогон.
- Обосновав потребность в специализированной ИС, были предприняты попытки получить соответствующий ОКР, работа дважды была доведена до согласованной Тем карточки и отклонена, как утверждалось, из-за недостатка средств.
- Имея уверенность в актуальности задачи, и, параллельно исполняя проект по СШП-локации, мы инициативно продвигали тему в фоновом режиме, своими силами.

- К настоящему моменту выполнена существенная часть работ в части проектирования ИС. Разработана блок-схема трансивера, разработаны и протестированы наиболее важные IP-блоки:
 - ядро RISK-V процессора;
 - $\Delta\Sigma$ -АЦП-второго порядка;
 - многофазный генератор с временным шагом 25 пс с малым джиттером;
 - быстродействующий УВХ;
 - на базе тестовых кристаллов и ПЛИС построены прототипы изделий демонстрирующие реальные возможности СШП в части локального позиционирования.
- Ведутся работы по реальному двунаправленному каналу связи в целях подтверждения ожидаемых характеристик. При в целом глубокой многолетней проработке проекта ИС работы держит только отсутствие финансирования.

УДК 621.376.6

Подходы к реализации OFDM модема с учетом особенностей системы связи 5G Advanced NTN применительно к высотным БЛА

Цуканова Е. Е., Лукьянчиков А. И., Сычев А. А., Клоков В. А., Каргин Н. И.
 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
 115409, г. Москва, Каширское ш., 31
 see001@mephi.ru

Рассмотрена возможность реализации технологии 5G Advanced NTN на высотных БЛА. Разработана модель физического уровня OFDM модема с параметрами, приближенными к данной системе. А также реализованы алгоритмы компенсации тактовой и частотной расстройек и интерференции, вызванной многолучевостью.

Ключевые слова: OFDM; 5G Advanced NTN; БЛА.

Введение

Высотные БЛА позволят оперативно развернуть сеть там, где отсутствуют базовые станции технологии 5G Advanced NTN. Однако необходимо бороться с межсимвольной интерференцией и ограниченностью ресурсов. Для этого требуется разработать алгоритмы обнаружения и устранения межсимвольной интерференции, адаптивное управление частотным спектром и систему компенсации частотных и временных ошибок.

Технология OFDM играет ключевую роль в реализации 5G Advanced NTN на высотных БЛА благодаря спектральной эффективности, устойчивости к многолучевому распространению сигналов, что критично для передачи данных в условиях высотного полёта, а также гибкости в адаптации к каналным условиям.

Описание модели

Технология 5G Advanced NTN охватывает рабочие диапазоны FR1-NTN и FR2-NTN.

Одно из ключевых нововведений в стандарте 5G является концепция гибких нумерологий и расстояний между поднесущими, что позволило использовать различные диапазоны частот и уровни задержек. В стандарте 5G NTN расстояние между поднесущими (SCS) может быть $15 \cdot 2^\mu$ кГц, где $\mu = 0...3$ (нумерология), т. е. от 15 до 120 кГц.

На рис. 1 изображена сетка ресурсов 5G NTN с символами OFDM по оси времени и поднесущими по оси частот, где:

- N_{RB} — количество ресурсных блоков;
- N_{SC}^{RB} — количество смежных поднесущих в одном ресурсном блоке RB;
- μ — номер нумерологии;
- 2^μ — количество слотов в одном подкадре.

Обработка данных производится по слотам (14 символам OFDM), где располагается сетка пилотов в шахматном порядке — размещение не стандартизировано, определяется оператором. В одном ресурсном блоке (RB) содержится 12 поднесущих. Формат слотов в структуре кадра 5G NTN разработанной модели является полностью нисходящим, т. е. используются OFDM символы нисходящей линии связи.

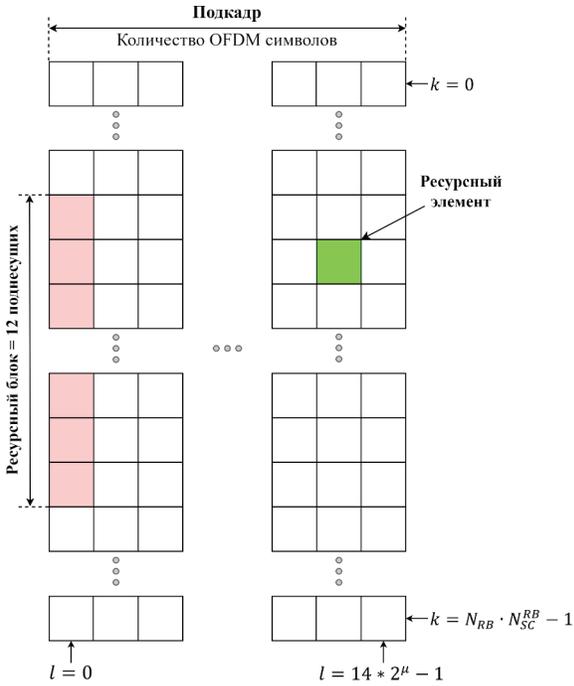


Рис. 1. Структура подкадра 5G NTN

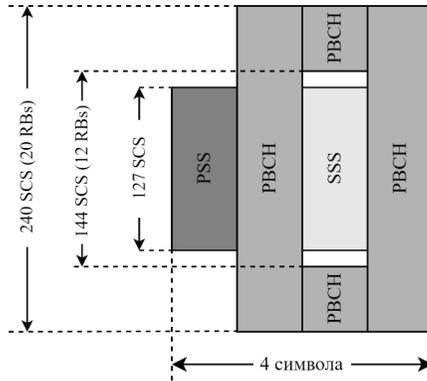


Рис. 2. Структура блока синхронизации сигналов (SSB)

На рис. 2 представлена структура блока синхронизации сигналов (SSB), который занимает четыре символа OFDM во временной области и 20 RB в частотной области.

Обнаружение и декодирование SS помогает пользовательскому оборудованию (UE) достичь синхронизации нисходящей линии связи по времени/частоте. Символ синхронизации (SS) NTN состоит из PSS (первичной SS) и SSS (вторичной SS):

- NTN PSS: модулированная BPSK m -последовательность длиной 127;
- NTN SSS: модулированная BPSK Gold-последовательность длиной 127.

Система компенсации ошибок по частоте и времени включает в себя синхронизацию по преамбуле и точную подстройку по пилотам, которая обновляется с каждым последующим слотом. Блок синхронизации сигналов (SSB) располагается в начале каждого фрейма, его периодичность зависит от нумерологии и ширины полосы радиоканала. Возможные варианты ширины полосы радиочастот одного радиоканала и соответствующее количество ресурсных блоков для различных нумерологий приведены в табл. 1.

Таблица 1. Конфигурация максимальной полосы пропускания N_{RB} для FRI-NTN

FRI-NTN						FRI-NTN				
SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	30 MHz	SCS (kHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}		N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	25	52	79	106	160	60	66	132	264	N/A
30	11	24	38	51	78	120	32	66	132	264
60	N/A	11	18	24	38					

Рассмотренные алгоритмы синхронизации и компенсации введенных искажений опираются на особенности 5G Advanced NTN, взятые из стандарта 3GPP TS 38.101-5 (Release 18).

Литература

1. 3GPP TS 38.101-5 «NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 5: Satellite access Radio Frequency (RF) and performance requirements (Release 18)» — 2024. v18.5.0.
2. 3GPP TS 38.211 «NR; Physical channels and modulation (Release 15)» — 2018. v15.2.0.
3. 5G Explained // MATLAB and Simulink — Video Series, 2019. URL: <https://www.mathworks.com/videos/series/5g-explained.html> (дата обращения: 03.06.2024).
4. Sahrab A. A., Yaseen A. D. Filtered orthogonal frequency division multiplexing for improved 5G systems // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 2021. Vol. 10. №4. P. 2079–2087.



УДК 629.056

Квантовые сенсоры и перспективная элементная база систем геопозиционирования и навигации нового поколения

к. т. н. Гусев С. В., Парёхин Д. А.

ФГУП «ВНИИФТРИ»

141570, г. Солнечногорск, рабочий посёлок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)

Приведен обзор и описание основных направлений развития систем навигации и синхронизации. Особое внимание уделено существующей и перспективной элементной базе, в частности квантовым сенсорам времени и частоты для построения инерциальных навигационных систем нового поколения.

Ключевые слова: навигация; ГНСС; инерциальная навигация; гироскопы; стандарты времени и частоты.

В настоящее время наиболее распространенными являются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), основанные на измерении расстояния от объекта до спутников, расположенных на геостационарной орбите. Существующие сегодня ГНСС имеют существенные ограничения и уязвимости. Использование спутниковых систем существенно ограничено в местах, где затруднена передача радиоволн, в арктической и околоарктической зонах [1]. Мощностные сигналы, поступающих от спутников ГНСС, расположенные на высоте 20 тыс. км от поверхности Земли, сравнительно невысоки и подвержены атакам с подменой сигнала и наведением преднамеренных помех [2]. Указанные проблемы, затрудняющие повсеместное использование спутниковых систем, уже сейчас являются существенным препятствием на пути внедрения технологий беспилотного наземного и воздушного транспорта.

В настоящее время активно ведутся разработки систем альтернативной навигации, пока в качестве дополнительных, для повышения надежности традиционных ГНСС. При этом, с развитием возможности систем альтернативной навигации возможен полный отказ от глобальных спутниковых систем.

К основным направлениям развития систем навигации без использования сигналов ГНСС можно отнести:

- инерциальные системы навигации, основанные на непрерывном измерении параметров движения объекта (скорости, ускорения, угловых скоростей, угла наклона) относительно выбранной системы отсчета;
- радионавигационные системы, являющиеся основным средством навигации в середине двадцатого века, используются и развиваются для обслуживания морского и воздушного транспорта;
- навигация по карте геомагнитных полей — наиболее перспективный метод навигации, основанный на построении карты геомагнитных полей и использовании сверхточных гравиметров. Одним из наиболее перспективных направлений измерения магнитного поля земли является метод основанный на «холодных» атомах;
- астрономические методы навигации основаны на определении положения объекта относительно положения известных небесных светил в выбранной системы координат;

- перспективные и малоизученные методы, такие как навигация по поляризации солнечного света.

Развитие альтернативных не глобальных средств навигации требует развития соответствующей элементной базы и технологий ее производства:

- датчики ускорения, наклона (акселерометры, инклинометры, гироскопы, магнитометры). Развитие технологии микроэлектромеханики (МЭМС) позволило уменьшить массогабаритные размеры и стоимость элементной базы, что открывает новые возможности для массового внедрения инерциальных систем;
- оптические системы и системы обработки данных положения объектов;
- квантовые сенсоры, позволяющие существенно повысить точность измерений положения объекта в пространстве и времени, являются основой наиболее перспективных направлений развития навигационных систем;
- приборы системы точного измерения времени и синхронизации, являющиеся неотъемлемой частью как традиционных спутниковых систем, так и альтернативных средств позиционирования.

ФГУП «ВНИИФТРИ» в настоящее время ведутся работы как по разработке навигационной аппаратуры потребителя как для приема сигналов традиционной спутниковой навигации, так и по ряду направлений развития создания сверхточных сенсоров и систем для альтернативных способов навигации.

Разработан стандарт времени и частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей не имеющий аналогов в России и превосходящий по своим точностным характеристикам известные западные аналоги [3]. Получена долговременная стабильность частоты на уровне $5 \cdot 10^{-12}$.

Ведутся работы по совершенствованию конструкции прибора, исследование возможностей технологии МЭМС и низкотемпературной многослойной керамики (ЛТСС) для повышения технологичности и надежности блока квантового дискриминатора, определяющего основные рабочие характеристики прибора.

Литература

1. Бакурский К. В., Никитин Р. Г., Макаров А. А. Проблемы навигационного обеспечения в арктической зоне // СПБНТОРЭС: Труды ежегодной НТК, 2021. — № 1 (76). — С. 54–56.
2. Добрякова Л. А., Лемишевский Л. С., Очин Е. Ф. Атаки на глобальные навигационные спутниковые системы и обнаружение спуфинга беспилотных кораблей, базирующихся на облачных технологиях // Ural radio engineering journal, 2018. — № 2. — С. 40–56.
3. Скворцов М. Н., Игнатович С. М., Вишняков В. И., Квашнин Н. Л., Месенцова И. С., Бражников Д. В., Васильев В. А., Тайченачев А. В., Юдин В. И., Багаев С. Н., Блинов И. Ю., Пальчиков В. Г., Самохвалов Ю. С., Парёхин Д. А. Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населенностей в парах атомов // Квантовая электроника, 2020. — № 6. — С. 576–580.

УДК 621.3

Стратегия разработки и освоения в серийном производстве отечественных электронных компонентов для аппаратуры радиосвязи

Фефилов И. И.

АО «Научно-исследовательский институт электронной техники»
394033, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5
ifefilov@niiet.ru

Приведена краткая характеристика рынка телекоммуникаций. Приведены Подходы к проектированию электронных компонентов для аппаратуры радиосвязи. Приведены перспективные микроэлектронные технологии, востребованные в аппаратуре радиосвязи. Предложены концепция развития, инфраструктурные решения и меры поддержки.

Ключевые слова: критически значимые электронные компоненты; аппаратура радиосвязи; микроэлектронные технологии; информационно-коммуникационных технологий сквозное проектирование; RISC-V; GaN-технологии гетерогенная интеграция.

Исходные данные

Микроэлектронная промышленность является важной отраслью электронной промышленности, ориентированной на выпуск готовых продуктов с высокой добавленной стоимостью со значительной долей интеллектуальной составляющей, достигающей 80 %.

В настоящее время, параметры микроэлектронных компонентов определяет характеристики любого современного оборудования, в том числе — аппаратуры радиосвязи.

Потребительские свойства конечной продукции в системах связи и телекоммуникации зависят от микроэлектронных технологий и программного обеспечения в среднем на 25–70 %.

Системообразующий статус отрасли требует достижения технологического суверенитета.

Учитывая катастрофическое недофинансирование в 90-е гг., российская микроэлектроника утратила рыночные позиции. Ключевыми проблемами отрасли являются санкционные ограничения, зависимость от зарубежных технологий и острый дефицит кадров.

Поэтому для всей отечественной микроэлектронной отрасли необходимо выстроить полноценную систему управления, сократить научно-техническое и технологическое отставание, обеспечить ее современной программно-аппаратной платформой и доступом к САПР мирового уровня, сократить научно-техническое и технологическое отставание, нарастить подготовку кадров.

Характеристика рынков сбыта

Сегодня в развитии российского рынка телекоммуникаций наступил переломный момент. Основная причина — ограничения в поставках зарубежного оборудования. В связи с этим Минцифры подготовило проект развития отрасли связи до 2035 года, включающий планы по внедрению новых технологий, переходу на отечественное

ПО и созданию цифрового кодекса. Предполагается развитие мобильных сетей четвертого, пятого и шестого поколений на отечественном оборудовании, отказ от сетей 3G и дальнейшее расширение доступности интернета. В период с 2031 по 2035 гг. планируется подключить к интернету 98 % домохозяйств и социально-значимых объектов, обеспечив скорость подключения не менее 1 Гбит/с. В этот же период предполагается полная замена оборудования стандарта LTE и более ранних поколений на отечественное телекоммуникационное оборудование (ТКО). В городах с населением более 100 тыс. человек планируется развернуть 5G-сети на базе отечественного оборудования. Помимо этого, в этот период должна начаться коммерческая эксплуатация 6G-сетей.

Согласно данным издания ЦИПР-2023 российский рынок интернета вещей растет на 12 % в год и к 2026 г. составит 208,5 млрд руб. В 2021 г. объем рынка интернета вещей (Internet of Things — IoT) в России, с учетом передачи данных, оборудования и программного обеспечения (ПО), составил 148,5 млрд руб. По прогнозу телекоммуникационного оператора МТС, на период до 2026 г. среднегодовой темп роста рынка интернета вещей в России составит 12 % после спада в 2022 г., а сам рынок может вырасти до 208,5 млрд руб. к 2026 г. Наиболее динамично развивающимися сегментами будут ЖКХ, «умные» жилые комплексы, промышленность, транспорт и логистика.

По данным аналитического агентства Oneside, к началу 2023 г. общее количество подключенных IoT-устройств в России в сегментах B2B/B2G выросло до 55,8 млн шт., из которых 34,2 млн работало в сетях телеком-операторов. В 2022 г. совокупная выручка российских операторов на рынке M2M/IoT выросла на 24 %, в 2023 темпы замедлились, но положительная динамика сохранится — аналитики ожидают к концу года рост на 9 %. В 2024 г. тенденция продолжится.

Подходы к проектированию электронных компонентов для аппаратуры радиосвязи

Общий подход к организации проектирования ЭКБ аппаратуры средств беспроводной связи индустриального применения и изделий ВВСТ предполагает:

- реализацию актуальной архитектуры построения средств и систем радиосвязи;
- учет технологических заделов предприятий-разработчиков радиоэлектронной аппаратуры;
- учет технологических возможностей предприятий-разработчиков электронных компонентов.

Определение целевых характеристик аппаратуры и формирование требований к элементной базе. Характеристики ЭКБ определяются и формируются Техническими Требованиями к аппаратуре радиосвязи.

Технические Требования к аппаратуре радиосвязи устанавливаются исходя из характеристик востребованных информационно-коммуникационных технологий, сочетающих:

- компьютерные технологии (программно-аппаратные платформы);
- сетевые технологии (средства передачи данных между различными устройствами);
- интернет-технологии (набор протоколов и инструментов для доступа к глобальной сети Интернет);



- мультимедийные технологии (набор сервисов, обеспечивающих возможность создания, обработки и воспроизведения различных видов медиа-контента, таких как текст, изображения, звук и видео).

Возможности информационно-коммуникационных технологий согласованы с уровнем микроэлектронных технологий.

Исходными техническими данными любого проекта являются:

- архитектура и структурная схема аппаратуры радиосвязи;
- перечень электронных компонентов.

В состав перечня электронных компонентов входят критически значимые (важные) компоненты, без применения которых целевые характеристики аппаратуры не будут достигнуты.

Алгоритм формирования перечня критически значимых компонентов:

- 1) анализ технических требований к аппаратуре, определение основных параметров аппаратуры;
- 2) анализ алгоритмов, обеспечивающих функциональные характеристики;
- 3) определение примерной архитектуры и требований к узлам/блокам/ программным и аппаратным компонентам;
- 4) проведение унификации узлов/блоков аппаратуры;
- 5) определение требований к ЭКБ;
- 6) анализ имеющегося технологического задела, возможности и целесообразности изготовления ЭКБ на отечественных предприятиях;
- 7) постановка востребованной технологии изготовления ЭКБ на отечественных предприятиях.

Перспективные микроэлектронные технологии

Для разработки критически значимых электронных компонентов аппаратуры радиосвязи предлагается развивать следующие микроэлектронные технологии.

(1) Сквозное проектирование вычислителей на основе ядер процессоров, имеющих архитектуру RISC-V;

Микропроцессорные технологии и инструменты на базе архитектуры RISC-V активно развиваются в России. Это позволяет создавать вычислители отечественного происхождения.

Набор команд/инструкций процессора это ISA (Instruction Set Architecture) распространяется под open source лицензией и не требует никаких отчислений за использование или разработку.

Важными свойствами технологии, востребованными при построении вычислителей для аппаратуры радиосвязи, являются:

- развитые дополнительные наборы инструкций и возможности построения других специализированных расширений базового набора инструкций, позволяющие учитывать особенности алгоритмов, обеспечивающих функциональные характеристики аппаратуры;
- возможности масштабирования производительности вычислителей, имеющих одинаковый базовый набор инструкций — от низкопроизводительных (одновременно, ультранизкопотребляющих) и до мощных серверных процессоров;
- возможности унификации интерфейсов взаимодействия.

(2) Перспективные GaN-технологии для силовой электроники и СВЧ-усилителей.

В последние годы в мире наблюдается быстрое развитие нитрид-галлиевых (GaN) технологий и рост производства GaN-приборов силовой и СВЧ-электроники. Причина таких процессов — замена ЭКБ кремниевых полупроводниковых приборов с худшими характеристиками. По электрическим параметрам (рабочая частота, быстродействие, энергоэффективность и т.д.) ЭКБ на основе GaN значительно превосходит ЭКБ на основе кремния.

Нитрид галлия является одним из самых востребованных и перспективных материалов современной электроники. Развитие технологий на основе этого полупроводника имеет стратегическое значение для таких отраслей, как космос, робототехника, телекоммуникации, автомобильная промышленность, промышленная автоматика и энергетика.

В СВЧ-технике технология позволяет обеспечить большую плотность мощности, меньшее потребление энергии и меньшие габариты. В характеристиках конечной аппаратуры связи это проявляется в большей дальности и скорости передачи данных, для локации — в большей дальности распознавания и сопровождения объекта. Главное, появляются новые возможности размещения аппаратуры — космические аппараты, беспилотные воздушные, наземные и морские носители и т.д.

В силовой электронике — меньшее значение межэлектродных емкостей нитрид-галлиевых ключей обеспечивает большую скорость переключения и меньшие потери. При этом значительно уменьшаются габариты импульсных источников питания за счет значительного увеличения частоты преобразования.

В светоизлучающей электронике — нитрид галлия может пропускать через себя ток большей силы и напряжения, чем обычный кремний, и может работать при более высоких температурах, что позволяет создавать более легкие, компактные и в то же время недорогие светодиоды.

Указанные преимущества в основных эксплуатационных характеристиках, с учетом повышенной стойкости к специальным видам воздействий (СВВ) сделали GaN-технологии одним из основных драйверов развития беспилотных платформ ВВСТ космического, воздушного, наземного и морского базирования, а также основной глубокой модернизации имеющихся образцов.

Для гражданского рынка нитрид-галлиевая технология стала основой быстрого развития аппаратуры телекоммуникационного сектора. Именно GaN-приборы стали основой построения базовых станций поколения 5G и 6G, а также приемопередатчиков современных низкоорбитальных спутниковых систем широкополосного доступа. Бурное развитие электротранспорта и электрических беспилотных платформ также обусловлено применением высокоэффективных GaN-ключей в преобразователях электрической энергии.

(3) Гетерогенная интеграция, сборка и корпусирование;

Для создания перспективной аппаратуры военного, двойного и гражданского назначения востребовано дальнейшее сокращение массогабаритных показателей изделий, которое возможно за счет создания многокристалльных сборок (микроэлектронных модулей), реализующих функционально законченный узел или блок. То есть посредством применения технологии гетерогенной интеграции — процесса объединения (сборки, 3D-сборки) множества отдельно изготовленных электронных компонентов на более высоком уровне.

В результате гетерогенной интеграции, внутри микросхемы будет находиться несколько кристаллов и других компонентов, образуя «систему-в-корпусе» (СвК, SiP, system-in-package). При этом, каждый из внутренних микроэлектронных компонентов может быть выполнен с использованием различных микроэлектронных технологий, имеющих различные проектные нормы, различные технологические процессы и выпущен разными фабриками в разное время.

Применение гетерогенной интеграции, по сравнению с альтернативным подходом построения «систем на кристалле» (СнК) приводит к сокращению сроков проектирования, быстрой отдаче вложенных в проектирование инвестиций, снижению рисков проектирования сложных кристаллов. Для ряда проектов, когда при построении микросхемы востребованы различные технологии, например, таких, как высокоинтегрированные компоненты, необходимые для построения современного телекоммуникационного оборудования и средств связи с ограниченными массогабаритными характеристиками, такой подход в настоящее время является единственно возможным.

На рис. 1 приводится пример использования гетерогенной интеграции при модернизации аппаратуры средств связи.

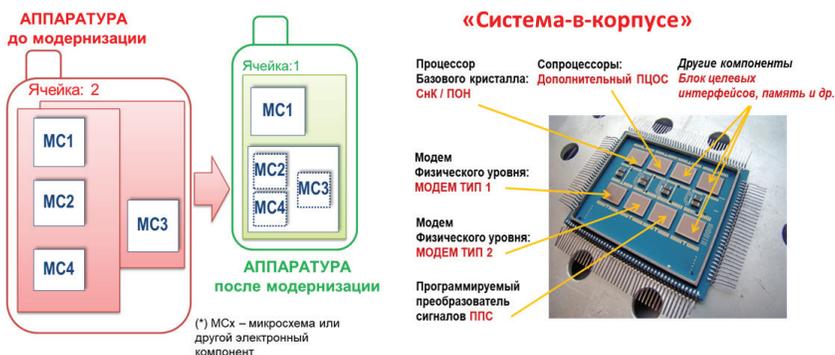


Рис. 1

Интеграция нескольких кристаллов в одну микросхему — «систему-в-корпусе», может использовать как разрабатываемые, так и уже имеющихся на внутреннем и внешнем рынках доступные бескорпусные компоненты и позволяет обеспечить возможности замещения компонентов pin-to-pin при их дальнейшей модернизации под целевые требования аппаратуры.

Через внедрение гетерогенных технологий может быть преодолена актуальная проблема отечественной микроэлектронной промышленности — ограниченная номенклатура ЭКБ отечественного производства (ЭКБ ОП).

Интеграция готовых и быстро проектируемых специализированных решений в едином сквозном маршруте проектирования и производства сложнотехнологической ЭКБ в кратчайшие сроки, дает возможность оперативного построения изделий по запросу и под **уникальные требования потребителя**. Это особенно важно разработчикам аппаратуры ВВСТ.

Формирование актуальной концепции развития

Цели развития отечественных предприятий по разработке и производству электронных компонентов для аппаратуры радиосвязи, как и для всей отрасли отечественной микроэлектроники определяются Основами государственной политики России в области развития электронной промышленности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу, согласованными со Стратегией развития электронной промышленности на период до 2030 года.

Сложившаяся в настоящее время ситуация в отечественной микроэлектронике диктует необходимость достижения технологического суверенитета.

Востребовано обеспечение поставок электронной компонентной базы отечественного производства (ЭКБ ОП), в том числе — замещения импортной электронной компонентной базы отечественными аналогами.

Целесообразно локализовать все этапы создания ЭКБ начиная с внедрения отечественных материалов и комплектующих для производства электронной компонентной базы и заканчивая разработкой, организацией серийного производства и обеспечения поставок суверенной ЭКБ и электронных модулей (ЭМ).

Должны быть созданы суверенные средства проектирования (САПР), средства производства ЭКБ и ЭМ, специальных и особо чистых материалов, газов и веществ.

(1) Миссия Концепции

Миссия Концепции заключается в переходе от раздробленного сектора предприятий микроэлектроники, занимающихся разработкой и производством электронных компонентов для аппаратуры радиосвязи к кооперационной экосистеме технологического развития.

(2) Цели развития

Цели развития предприятий микроэлектроники, реализующей разработку и производство электронных компонентов для аппаратуры радиосвязи:

- формирование существенного вклада предприятий в достижение технологического суверенитета РФ;
- рост объемов выручки предприятий через кооперационное взаимодействие в регуляторной, экономической, научно-технической, производственной и технологической сферах деятельности;
- достижение существенной доли поставок суверенной электронной компонентной базы на внешние и внутренние рынки, в том числе — региональным предприятиям, занимающимся производством радиоэлектронной аппаратуры.

Для достижения целей предлагается разработать и реализовать проактивную Стратегию взаимодействия предприятий, основанную на организации согласованной инициативной деятельности с учетом взаимного планирования направлений развития, возможностей адаптации имеющихся заделов множества сторон, совмещения «дорожных карт», совместного решения научно-технических, производственных, технологических, экономических вопросов и преодоления бюрократических ограничений. Важно отметить, что Стратегия взаимодействия предприятий направлена на повышение эффективности разработки и производства ЭКБ за счет сокращения времени научно-производственного цикла.

Инструментом достижения целей станет единая система мониторинга и управления научно-техническими, производственными и технологическими



процессами, включающая электронный реестр компонентов, материалов и специального технологического оборудования.

Инфраструктурные решения

Межотраслевой Центра Технологических Компетенций Электронных Компонентов, Средств и Систем Связи (научно-производственный и научно-образовательный **кластер** предприятий и организаций).

В ЦТК должны участвовать компании, занимающиеся разработками, производством и поставками технологического оборудования, необходимого для создания и дооснащения микроэлектронного производства в рамках перспективных технологий.

Научно-техническое и кадровое обеспечение кластера поддерживается научно-образовательной платформой, состоящей из вузов, Университетов и Учебных центров.

В целях увеличения объемов производства и номенклатуры электронных компонентов для аппаратуры радиосвязи на предприятиях микроэлектроники предлагается реализовать следующие мероприятия:

- создать сетевой кооперационный производственный центр;
- создать кооперационный производственный склад (хранилище), в том числе в целях обеспечения формирования кооперационного резервного запаса.

В целях повышения научно-технического уровня выпускаемой продукции предлагается реализовать следующие мероприятия:

- создать сетевой кооперационный дизайн-центр и организовать постановку совместных проектов, направленных на объединение научных, технических и технологических заделов, в том числе с учетом трансфера технологий;
- создать сетевой кооперационный центр обработки данных (ЦОД) с поддержкой отечественного сквозного маршрута проектирования РЭА;
- создать совместную библиотеку СФ-блоков, ЭКБ и ЭМ и совместную библиотеку видов программного обеспечения (ПО);

Меры поддержки

В перспективе для отечественных предприятий микроэлектроники, занимающихся разработкой и производством электронных компонентов для аппаратуры радиосвязи, предлагается проработать следующие отраслевые меры поддержки:

(1) Льготная ставка налога на прибыль, устанавливаемая для предприятий микроэлектроники.

(2) Для поощрения трансфера технологий государство предоставляет возможность организациям изымать из налогообложения доходы, не превышающие установленный фактический порог, полученные от трансфера технологий. Доходы, превышающие этот уровень, облагаются льготной налоговой ставкой.

(3) Налоговые каникулы. Предоставление налоговых каникул может быть увязано с условиями инвестиции всей прибыли или ее части в развитие производств или постановку НИОКР.

(4) Госзаказ. Госзаказ (до 7 лет) на критически значимую радиоэлектронную аппаратуру с обязательной локализацией критически значимой ЭКБ. НИОКР ВВСТ должны финансироваться с учетом разработки критически значимой специализированной ЭКБ, перечень разрабатываемой ЭКБ и объемы финансирования определяются и устанавливаются до постановки НИОКР. Государственный заказ на выполнение НИОКР.

УДК 621.3.049

Архитектура сетевого микропроцессора в обеспечение задач синхронизации времени в различных применениях

Александров А. В.*АО «НИИМА «Прогресс»**125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54**info@i-progress.tech*

Предлагается рассмотреть вариант архитектуры сетевого микропроцессора в обеспечение протоколов синхронизации времени в различных применениях, в частности в локальных системах навигации. Одним их ключевых элементов локальных систем навигации является подсистема временной синхронизации сети опорных радионавигационных [1–3], формирующих локальное радионавигационное поле. Точность сведения шкал времени радионавигационных станций определяет, помимо прочего, точность определения местоположения абонента. В настоящее время потребителям доступны несколько источников точного времени — это ГНСС, различные сетевые технологии (Ethernet, WiFi), радиопередатчики точного времени.

Ключевые слова: сетевой микропроцессор; микросхема; сетевые протоколы; протоколы временной синхронизации; синхронизация времени; PTP; PTPv2; локальные системы навигации; навигация.

Введение

Для синхронизации времени и передачи данных необходима поддержка соответствующей сетевой инфраструктуры (серверы, транспортные сети, обеспечивающие требуемую точность синхронизации). В которой возможно построение распределенных структур с высокой точностью синхронизации. Для всех этих элементов нужна разнообразная ЭКБ, в частности сетевые микропроцессоры. В настоящее время значительное количество отечественного сетевого оборудования выполняется на ПЛИС или зарубежной ЭКБ.

Описание архитектуры сетевого микропроцессора

Разнообразие сетевых протоколов, включая протоколы временной синхронизации (NTP, PTP, PTPv2) требует максимальной открытой и конфигурируемой архитектуры сетевого процессора.

Микросхема сетевого микропроцессора должна быть разработана с использованием российских вычислительных ядер архитектуры RISC-V, что позволит обеспечить совместимость с отечественными операционными системами на базе Linux и приложениями разрабатываемые под вычислительные ядра RISC-V64.

Поддержка операционных Linux систем и большого количества сетевых протоколов в реальном масштабе времени обуславливает наличие четырех вычислительных ядер процессора архитектуры RISC-V с разрядностью — 64 бит, тактовой частотой не менее 1 ГГц, с когерентным доступом к кеш-памяти 1-го (для каждого ядра собственная) и второго (объединенная для всех ядер) уровня.

В состав микросхемы должен быть включен аппаратный криптографический сопроцессор, обеспечивающий поддержку отечественных криптоалгоритмов «Кузнечик», «Магма», «Стрибог», AES и др.



Микросхема должна включать высокопроизводительный программируемый сетевой пакетный процессор (Packet Processor) состоящий из ускорителей для обработки сетевых пакетов и поддержкой до 8-м каналов Ethernet с пропускной способностью не ниже 1 Гб/с.

Должна быть реализована доверенная загрузка и доверенное обновление исполняемого программного обеспечения при помощи выделенного контроллера RISC-V32 и специализированной операционной системой.

Итого микросхема сетевого микропроцессора должна обеспечивать:

- работу четырех вычислительных ядер процессора архитектуры RISC-V с разрядностью — 64 бит с когерентным доступом к кеш-памяти 1-го (для каждого ядра собственная) и второго (объединенная для всех ядер) уровня;
- работу выделенного 32-битного микроконтроллера с системой команд RISC-V, обеспечивающего решения задач доверенных зон, загрузок, а также задач жесткого реального времени;
- высокоскоростную шину для внешней памяти стандарта DDR4/DDR4LP;
- 8-м каналов Ethernet с пропускной способностью не ниже 1 Гб/с;
- 2 канала Ethernet с пропускной способностью не ниже 10 Гб/с;
- автоматический разбор Ethernet пакетов (Packet Processor);
- потоковое шифрование входных/выходных данных по отечественным алгоритмам шифрования ГОСТ Р 34.12–2015 (алгоритмы «Кузнечик» и «Магма»), а также международного алгоритма AES;
- поддержку передачи данных по шине PCI Express для построения стека из нескольких микросхем;
- работу хеш-функции в соответствии с криптографическим алгоритмом ГОСТ 34.11-2018 с размером блока входных данных 512 бит и размером хеш-кода 256 или 512 бит;
- обработку и вывод графической информации;
- работу не менее 16 каналов прямого доступа к памяти (ПДП) для организации пересылок типа «память-память», «внешнее устройство-память», «память-внешнее устройство», включая работу с блоками криптографической обработки данных;
- работу системы по прерываниям, наличие у каждого вычислительного ядра контроллера прерываний не менее, чем с 16 входами с аппаратной коммутацией внешних устройств;
- загрузку рабочих программ из внешней флеш-памяти, а также с использованием UART и SPI;
- гибкое управление режимами энергосбережения;
- работу с привязкой к реальному времени;
- отсчет интервалов времени и синхронизацию работы программного обеспечения в режиме жесткого планирования времени.

Одной из ключевых проблем для реализации данного сетевого процессора, является недоступность отечественных технологий уровня 28 нм и ниже, а также отечественного рынка сложных СФ-блоков (DDR4, Ethernet 10 Гб/с и т.д.).

Основные области применения микросхемы сетевого микропроцессора:

- оборудование для АСУ ТП, робототехнических и беспилотных систем;

- использование в сетях передачи данных в качестве основного компонента доверенных маршрутизаторов домашнего, офисного и специального применения;
- в универсальных контроллерах промышленного оборудования;
- автомобильная электроника в системах навигации (в качестве бортового процессора);
- в системах контроля функционирования доверенных серверов и вычислительных систем;
- терминалах, кассовых аппаратах;
- и др. применениях.

Заключение

Разработка сетевых микропроцессоров позволит перейти на сетевое оборудование полностью реализованному на отечественной ЭКБ. Учитывая техническую сложность сетевых процессоров, предлагается стандартизовать проектирование сетевых микропроцессоров и сложных СФ-блоков для минимизации затрат времени и стоимости.

Литература

1. Корнеев И. Л., Егоров В. В. Задачи практического применения локальной системы навигации // *Наноиндустрия*, 2020. Спецвыпуск (96). — С. 12–17.
2. Корнеев И. Л., Кузнецов А. С., Королев В. С. Режимы работы локальной системы навигации в проекте КОНСУЛ. Потребители системы КОНСУЛ // *Наноиндустрия*, 2021. Спецвыпуск (7s). — Т. 14 (107). — С. 57–59.
3. Кондрашов З. К., Корнеев И. Л. Обеспечение телематики и навигации автономного транспорта и роботов в развитие технологического суверенитета радиоэлектроники Российской Федерации. Использование локальной системы навигации, комплексированной с инерциальной навигационной системой // *Наноиндустрия*, 2023. Спецвыпуск (9s). — Т. 16 (119). — С. 10–18.

УДК 528.7

Навигация по подстилающей поверхности с использованием нейросетевых алгоритмов

Зинченко А.А.

- Захват и обработка кадра по устранению дисторсии изображение, с использованием внутренних параметров камеры.
- Применение алгоритма сохранения параллельности линий для фотограмметрии. Преобразования изображение, в аналогичный вид со спутника (birdseye).
- Склейка панорамы изображений из обработанных кадров. Подсчет итогового среднего смещения кадра, путем кросс-корреляции(Template Matching) и поиском характерных точек(Feature Extractor).
- Поиск панорамы на карте местности, методом кросс-корреляции карты особенностей(границ) на изображении (оператор Собеля).
- Создание датасета карт, выделение иерархии классов, и аугментация выборки данных.
- Альтернативный метод поиска панорамы на карте местности, с помощью сегментационной нейронной сети(BiseNet).
- Построение графа связности возможных путей, по результатам сравнения панорамы с картой местности.
- Корректировка ложных путей, с помощью применение алгоритма сверточной нейронной сети (YOLO), для поиска особых объектов на панораме.
- Вычисление координат летательного аппарата, по результатам работы дескрипторов поиска изображения на карте местности.
- Реализация алгоритма поиска оптимального пути движения ВС.

УДК 621.391.26

Отечественная СБИС для высокоточного позиционирования**Зимин А. Г., Яковлев В. В., Люсин С. В.***АО «НИИМА «Прогресс»**125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54**niima@i-progress.tech*

Разрабатывается отечественная СБИС для высокоточного позиционирования. СБИС включает цифровую часть обработки ГНСС-сигналов. Ориентирована на высокоточное слежение по коду и фазе несущей частоты. Уделено внимание борьбе с многолучевостью, подавление сигналов помехи и выявление ложных сигналов. Применение: точная навигация, геодезия.

Ключевые слова: СБИС; ASIC; ГНСС; ПРО-ГЕО; геодезический комплекс.

В рамках геодезического направления в АО «НИИМА «ПРОГРЕСС» разрабатывается геодезический комплекс, ключевым звеном которого является ГНСС приемник ПРО-ГЕО. Основные технические характеристики ГНСС приемника определяются микросхемой СБИС обработки сигналов ГНСС. До настоящего времени в России не было своей специализированной СБИС для приемников геодезического класса. Разработка собственной СБИС позволит предложить российскому рынку геодезические ГНСС приборы с высокой степенью локализации.

Разрабатываемая СБИС предназначена для цифровой обработки ГНСС-сигналов и включает в себя:

- 500 универсальных и специализированных корреляционных каналов слежения за всеми существующими ГНСС-сигналами;
- фильтры подавления помех;
- системы управления и обработки;
- интерфейсы для обмена данными с внешним вычислителем и периферийными устройствами.

Основные свойства и характеристики, заложенные в разрабатываемую микросхему:

- высокоточная СБИС, применимая для высокоточной навигации и геодезических задач;
- работает по всем сигналам всех спутниковых систем;
- помехозащищенная;
- с подавлением влияния многолучевости;
- с выявлением ложных сигналов (Anti spoofing);
- способная принимать корректирующую информацию, в том числе, через открытые международные и отечественные сервисы;
- структура СБИС ориентирована на использование оригинальных алгоритмов решения задачи позиционирования (RTK, RTPK, PPP) с применением, как внутренних, так и внешних микропроцессоров.

Литература

1. Guenter W. Hein, Thomas Pany, Stefan Wallner, Jong-Hoon Won. Platforms for Future GNSS Receiver. A discussion of ASIC, FPGA and DSP Technologies, "Inside GNSS", University Far Munich.

2. Heung-Su Kim, Byeong-Gyun Kim, Sung-Wook Moon. Design of a High Dynamic-Range RF ASIC for Anti-jamming GNSS Receiver // *Journal of Positioning Navigation and Timing*, 2015. 4(3): 115–122.
3. Tasneem Yousif and Paul Blunt Interference Mitigation for GNSS Receivers Using FFT. Excision Filtering Implemented on an FPGA. Department of Electrical and Electronics Engineering, College of Engineering, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK.
4. Ward P.W. Second Workshop on Satellite Navigation Science and Technology for Africa, 6–23 April 2010. GPS Receivers, Receiver Signals and Principals of Operation, Phillip W. Ward, NavWard Consultants, Garland, TX USA.

УДК 621.3.049.77

Использование микропроцессорных ядер на основе архитектуры RISC-V для систем радиоподвижной связи

Игошин А. В., Лебедев А. В., Степанова А. С.

ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4,4а
info@nm-tech.org

В работе рассмотрена проблематика перехода проектирования и производства микросхем, используемых в системах радиоподвижной связи отечественным разработчиком, включающим микропроцессорные ядра на основе архитектуры RISC-V.

Ключевые слова: RISC-V архитектура; микропроцессорные ядра; системы радиоподвижной связи.

После февраля 2022 года реальность вынудила Российские компании выстраивать товаропроводящие цепочки для размещения заказов на зарубежных микроэлектронных фабриках и доставки микросхем и/или полупроводниковых пластин в Российскую Федерацию. При этом обязательным условием стало различие в топологии микросхем с сохранением расположения контактных площадок, в противном случае все разработчики РЭА будут вынуждены реализовать массовое изменение конструкции аппаратуры, где эти микросхемы применяются. Разработчик микросхемы вынужден заново разрабатывать топологии, чтобы показать, что они не имеют ничего общего с ранее выпускаемыми микросхемами, что приводит к удорожанию микросхем и влечет риск непоставки этих микросхем в РФ, большая часть которых используется в критических инфраструктурах, связанных с системами радиоподвижной связи.

Сложившаяся ситуация повлекла массовый переход российских разработчиков с микропроцессорных MIPS и ARM на ядра на основе архитектуры RISC-V. Этот переход позволил нивелировать проблемы высокой стоимости лицензий микропроцессорных ядер зарубежных компаний, закрытой архитектуры, отсутствия совместимости, повышающее трудоемкость задач по портированию программного обеспечения и алгоритмов под последующие решения, требующего постоянной технической поддержки.

Еще одной важной особенностью использования микропроцессорных ядер на основе архитектуры RISC V является тот факт, что все исходные коды и конструкторская документация разрабатывается внутри страны и позволяет тем самым более оперативно отрабатывать эти решение на отечественных микроэлектронных производствах. Аттестация микропроцессорных ядер на основе архитектуры RISC-V на отечественном производстве позволит ускорить и удешевить разработку отечественных микросхем.

Основными требованиями для микропроцессорного ядра в радиоподвижных системах являются высокая производительность (частота), малое потребление. Реализовать этот необходимый минимум на отечественном микроэлектронном производстве возможно за счет разработки специализированного PDK, библиотеки стандартных элементов, высокосортных интерфейсов подключения других микросхем, используемых в системах радиоподвижной связи, и библиотеки

ввода/вывода. Помимо этого, следует рассмотреть возможность применений стандартных специализированных команд протокола RISC-V для обработки радиосигнала. Следует обратить особое внимание на программное обеспечение позволяющее оптимально использовать возможности архитектуры.

Заключение

Аттестация и производство микросхем, используемых в системах радиоподвижной связи отечественным разработчиком, включающим микропроцессорные ядра на основе архитектуры RISC-V, на отечественном производстве, необходимо, возможно и реализуемо.

Литература

1. ARM vs RISC-V // Tech Journeyman. URL: <https://techjourneyman.com/blog/arm-vs-risc-v>.
2. Крутчинский С. Г. Современная микросхемотехника и конкурентоспособность отечественных аналоговых ИС и смешанных СФ-блоков. // Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2008). — Москва. — 550 с.
3. RISC-V, Spike, and the Rocket Core, Ben Keller // CS250 Lab Assignment 2 (Version 091713), 2013. 23 p.

УДК 681.5, ББК 65.32

Современные тренды развития систем транспортной телематики в условиях импортозамещения

Полгорацкий В. Е.*Генеральный директор**ООО «АМТ-ГРУПП» (TransNetIQ)**141080, г. Королёв, ул. Дзержинского, 29*

В настоящее время в условиях санкционного давления российский рынок покинули многие иностранные автомобильные бренды, а также ИТ-компании. В докладе представляется обзор существующих отечественных систем транспортной телематики и рассматриваются основные направления их развития с учетом применения общемировых технологических трендов.

Ключевые слова: транспортная телематика; транспортно-логистические системы; искусственный интеллект; предиктивная аналитика; промышленный интернет вещей; микроэлектроника.

Введение

Россию покинули MAN, SCANIA, Volvo и другие автомобильные гиганты. А в настоящее время прекращает или значительно сокращает деятельность на территории Российской Федерации компания Gurtam с системой «Виалон», которая являлся основой для построения большинства коммерческих корпоративных телематических систем.

При этом в Российскую Федерацию заходят китайские автомобильные бренды (FAW, SITRAK). А в части транспортной телематики продолжают конкурентную борьбу за освобождающееся место на рынке отечественные вендоры транспортной телематики (ГлонассСофт, Форт-Телеком, Омником, Автограф, Автопилот, Спейстим и другие).

Кроме того, следствиями текущей геополитической и экономической ситуации являются тренды создания крупными компаниями частных транспортно-логистических систем, развернутых на их собственных корпоративных вычислительных мощностях. Это обусловлено требованиями по информационной безопасности, уходом от вендорной зависимости, необходимостью максимально полного учета специфики бизнес-процессов предприятий.

Также одним из трендов является стремление покупателей подобных систем контролировать не сколько процесс перевозки, а финансовый результат деятельности бизнес-процесса транспортной логистики, его влияние на общий финансовый результат деятельности компаний.

Общемировыми технологическими трендами являются бурное развитие технологий искусственного интеллекта, предиктивной аналитики, технологий промышленного интернета вещей, микроэлектроники и связи. Это дает предпосылки для качественного технологического развития систем транспортной телематики.

Основные тезисы

В докладе представляется обзор существующих отечественных систем транспортной телематики и рассматриваются основные направления их развития, в том числе:

- методы и средства предиктивного анализа и генеративного искусственного интеллекта (больших языковых моделей) — как средство повышения конкурентоспособности универсальных телематических платформ;
- подходы к модульному построению систем транспортной телематики для обеспечения быстрого создания индивидуальных решений для потребителей;
- специализированные решения для производителей и дилеров автотранспортных средств;
- новые отраслевые решения («алкозамки» и пр.);
- специализированные решения для управления всеми видами транспорта и логистики во внутренних дворах промышленных предприятий (корпоративные центры управления транспортом и логистикой), решения по управлению заявками на перевозки пассажиров и грузов (корпоративное «Яндекс-такси»).

УДК 004.383.3

Реализация методов распознавания сигналов на СБИС K1879BM8Я с применением нейронных сетей

Ландышев С. В., Жолондковский В. В.*АО НТЦ «Модуль»**125190, г. Москва, 4-я ул. 8 марта, 3**landysh@module.ru*

В статье рассматриваются методы, применяемые для распознавания параметров связанных, радиолокационных и навигационных сигналов с применением нейронных сетей. Описываются алгоритмы предобработки двумерных сигналов для выполнения инференса обученных нейронных сетей известных топологий. Описываются применяемые программно-аппаратные средства и их характеристики для эффективной реализации задачи.

Ключевые слова: предобработка сигналов; радиолокация; нейронные сети; параллельные вычисления; СнК; СБИС K1879BM8Я.

В традиционном подходе цифровой обработки сигналов (ЦОС) можно выделить несколько этапов: прием сигнала, предварительная обработка, обнаружение сигнала в широком смысле — обнаружение стартового импульса и выделение полезной информации. Для обнаружения сигнала используются методы максимального правдоподобия, которому подчиняется и предобработка. В этом методе используются априорно определенные критерии, по которым строится пороговая функция, которая, в свою очередь, определяет наличие искомого сигнала в сообщении. При выделении полезной информации также используется метод максимального правдоподобия для декодирования символов сообщения. В любом случае, для традиционного подхода требуется математически точно задать критерии правдоподобия. Это возможно только при наличии полной информации о среде распространения сигнала и природе возможных помех. В реальных условиях точное описание среды является плохо обусловленной задачей, которую трудно формализовать в достаточной степени для всегда достоверного обнаружения и декодирования сигнала.

Одним из методов решений плохо формализуемых задач является применение искусственного интеллекта, когда заранее обученная нейронная сеть используется для обнаружения и классификации образов в сигналах различной природы. Широко применяются нейронные сети для обработки изображений. В глобальной сети свободно доступны наборы размеченных для обучения изображений, программные инструментальные средства для создания обученных нейронных сетей с заданной топологией и развитое сообщество пользователей.

Нейросетевая обработка сигналов в областях связи и радиолокации существенно отстает по объему и качеству предлагаемых решений по сравнению с обработкой изображений. Во многом это определяется составом используемых аппаратных средств — как правило устройства ЦОС являются встраиваемыми решениями, к которым предъявляются особые требования к энергопотреблению и габаритам. В датчиках и мобильных устройствах применялись, в основном, маломощные процессоры и микроконтроллеры, которые не имеют ресурсов для выполнения инференса — применения нейронной сети. Кроме этого, инфраструктура нейросетевой обработки вышеупомянутых сигналов не так развита, как инфраструктура



обработки изображений — сообщество потребителей существенно меньше и, как следствие, почти полное отсутствие предлагаемых готовых решений.

Ситуация с применением ИИ в задачах ЦОС в связи с радиолокации изменяется в сторону широкого применения благодаря наработкам, связанным с решением задач по распознаванию и синтезу речи — действительно, исходный сигнал, записанный с одного микрофона является двумерным сигналом (оцифрованные и упорядоченные по времени отсчеты сигнала), и алгоритмическая база его обработки может применяться и для обработки связанных и радиолокационных сигналов. В этой статье рассматривается этот подход в части предварительной обработки сигналов.

Также развитию этой темы способствует технологический прорыв в КМОП-технологиях, который позволил создавать специализированные энергосберегающие вычислители для эффективного выполнения инференса нейронной сети непосредственно на встраиваемом устройстве.

В статье рассматривается применение СБИС K1879BM8Я для ЦОС с применением нейросетевой обработки, в частности раскрываются аспекты предварительной обработки сигналов и применение существующих инструментов для инференса предварительно обученной нейронной сети. В статье не рассматриваются вопросы, связанные с обучением нейронных сетей.

СБИС K1879BM8Я [1] принадлежит к классу устройств Система-На-Кристалле (СНК) с гетерогенной архитектурой. В состав микросхемы включены пять процессорных систем ARM CortexA5 и 16 процессорных ядер NeuroMatrix Core 4 (NMC4).

Литература

1. Микросхема интегральная K1879BM8Я. Руководство по эксплуатации. — URL: <https://www.module.ru/uploads/products/18798-ca3d98c993.pdf>.

УДК 621.382.2/.3, ББК 32.853

Особенности проектирования быстродействующих радиационно стойких КМОП СФ-блоков nano-СБИС объемного кремния для бортовой аппаратуры

Герасимов Ю. М., к. т. н., с. н. с.

АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

Получила развитие методология проектирования цифровых радиационно стойких КМОП СФ-блоков для nano-СБИС СнК объемного кремния (ОК) уровня 180–40 нм в части достижения их предельного быстродействия. Даны рекомендации по выбору технических решений для комплексного обеспечения высокой радиационной стойкости и максимального быстродействия цифровых критических трактов СБИС для бортовой аппаратуры.

Ключевые слова: КМОП nano-СБИС; предельное быстродействие; «система на кристалле» (СнК); дозовая стойкость; радиационно стойкое проектирование (РСП).

Введение

КМОП СБИС ОК уровня 180–40 нм (nano-СБИС) перспективны для создания в России доверенной ЭКБ, предназначенной для работы в экстремальных условиях при радиационных воздействиях. Данные технологии позволяют создавать быстродействующие nano-СБИС СнК категории не хуже РС2 [1], содержащие десятки-сотни миллионов элементов на кристалле. При заданном уровне технологии создание таких СБИС возможно при использовании методологии радиационно стойкого проектирования (РСП) [2, 3].

Радиационно стойкое проектирование цифровых СФ-блоков КМОП nano-СБИС

Основными методами РСП являются: использование жестких р+ и p+ охраны в «подложке» и «кармане» для предотвращения эффекта «зашелкивания» при воздействии тяжелых частиц (ТЧ) и снижения токов утечки при стационарном ионизирующем облучении. Дополнительно для повышения дозовой стойкости необходимо использовать опции n-МОП-транзисторов с повышенным пороговым напряжением [2, 3]. Сбоеустойчивость при воздействии ТЧ, кроме архитектурных методов на уровне элементов СБИС может быть повышена увеличением размеров критичных элементов и выравниванием токов p- и r-МОП групп транзисторов в них.

Быстродействие цифровых СФ-блоков КМОП nano-СБИС

Проанализированы параметры быстродействия логических цепей и цепей синхронизации СБИС (рис. 1).

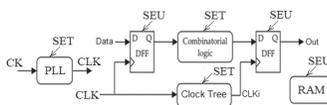


Рис. 1. Конвейер передачи данных в СБИС СнК



Показано, что любую логическую цепь с разветвлениями можно представить в виде цепочки эквивалентных инверторов с собственными параметрами элементов: m_i , n_i , P_i , t_{di}^+ , t_{di}^- , где m_i — коэффициент разветвления на входе, n_i — коэффициент объединения по выходу, P_i — коэффициент мощности элемента (эффективный ток), t_{di}^+ , t_{di}^- — собственные задержки i -го логического элемента в цепи при переключении в лог. 1 и лог. 0. Для инверторов $m_i = n_i = 1$, а $t_{di}^+ = t_{di}^- = 0$.

Цепочка инверторов в цепи синхронизации с оптимальными числом каскадов и коэффициентами нагрузки узлов ($M_1 = 4$ для технологии ОК) обладает максимальным предельным быстродействием [4, 5]. Предельной частотой передачи сигнала равномерной цепочки инверторов ($f_{\text{пред}}$) является максимальная частота входного меандра с асимптотическими фронтами (t_{ro} , t_{fo}) на входе, которая передается без искажений бесконечно длинной равномерной цепью. Равномерная цепь — цепь в которой абсолютные размеры инверторов — P_i — возрастают в геометрической прогрессии с постоянным коэффициентом $M_0 = \sqrt[n]{M_1}$, где M_1 — суммарный коэффициент нагрузки/разветвления в цепи, n — число каскадов. Так, например, для КМОП-технологии уровня 65 нм в нормальных условиях $f_{\text{пред}} \approx 5$ ГГц [5].

КМОП цепи комбинационной логики, содержащие многоходовые логические элементы (ЛЭ), обладают пониженным быстродействием по сравнению с цепями инверторов, используемых в цепи синхронизации процессорных ядер СБИС. Пониженное быстродействие связано с наличием в ЛЭ последовательных и параллельных групп транзисторов, приводящих к наличию внутренних паразитных емкостей и снижению эффективного тока заряда/разряда этих емкостей и емкости нагрузки на выходе элемента. Показано, что время переключения ЛЭ зависит как от комбинации входных сигналов, предварительно поданных на его входы, так и приводящих к его переключению. Число таких комбинаций равно $2^N - 1$, граничными являются переключения по входу 1 или входу N . Моделирование последовательно соединенных ЛЭ различного типа показало, что в зависимости от числа каскадов и типов ЛЭ предельное быстродействие снижается в 3–5 раз по сравнению с цепочкой инверторов. При использовании в цепи только элементов И-НЕ или ИЛИ-НЕ возможно выравнивание скажности сигнала. При чередовании ЛЭ типа И-НЕ/ИЛИ-НЕ в цепи происходит существенное искажение меандра сигнала.

При воздействии ТЧ в узлы логической цепи возникают импульсы помехи. В зависимости от длительности импульса помехи цепь может быть формирующей или затухающей. Длительность импульса помехи, передаваемая цепочкой инверторов без искажений: $t_{\text{мин}} \approx 3 \cdot t_{a0} (\gamma_{\text{вых0}} + \gamma_{\text{вх0}} \cdot M_0)$ [5], где t_{a0} — средняя асимптотическая задержка, M_0 — коэффициент нагрузки в узлах цепи, $\gamma_{\text{вых0}}$, $\gamma_{\text{вх0}}$ — коэффициенты соотношения входной и выходной емкости в узле цепи [4, 5]. При воздействии ТЧ оптимизация цепи по сбоеустойчивости заключается в правильном выборе относительных размеров транзисторов в каскадах, размера первого каскада и коэффициента нагрузки в критическом тракте (sizing). Использование элементов минимальных размеров в критических трактах нежелательно.

Литература

1. Никифоров А. Ю., Телец В. А., Бойченко Д. В. Требования радиационной стойкости — экзотика для гурманов или гарантия наличия и технического уровня результата разработки для всех категорий потребителей ЭКБ? // 3-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и электронные модули». — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. — С. 32–36.

2. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричкович Я. Я., Со-лохина Т. В. От первых КМОП-транзисторов до радиационно стойких нанометровых КМОП СБИС СнК // Наноиндустрия, 2019. Спецвыпуск (89). — С. 268–274.
3. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Петричкович Я. Я. Радиационно стойкое проектирование нанометровых КМОП СБИС: реалии и мифы // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-2 (102). — С. 319–324.
4. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г. Асимптотические параметры быстродействия нанометровых КМОП СБИС // Естественные и технические науки, 2011. — № 6. — С. 492–498.
5. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричкович Я. Я., Сергеев Д. К. Особенности проектирования сбоеустойчивых, сверхбыстродействующих логических цепей КМОП СБИС СнК // Наноиндустрия, 2020. Спецвыпуск (96). — Ч. I. — С. 220–228.



УДК 629.3.052

Лазерные локационные системы на отечественной компонентной базе в системах интеллектуальной навигации беспилотного транспорта и роботов

Старовойтов Е. И.

АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

info@i-progress.tech

Рассмотрены варианты построения лазерных локационных систем на электронной компонентной базе отечественного производства, предназначенные для использования в составе систем интеллектуальной навигации беспилотного транспорта и роботов. Сфера применения таких систем охватывает личный и общественный транспорт, промышленность, сельское хозяйство, логистику и складское хозяйство. Главным результатом является обеспечение автономной навигации с субметровой и дециметровой точностью.

Ключевые слова: лазерная локация; фотоприемное устройство; ASIC; ROIC; беспилотный транспорт; робот.

Введение

Лазерные локационные системы (ЛЛС) используются для навигации роботов, летательных аппаратов, при управлении движением различных машин и механизмов в промышленности. Самой распространенной и чаще всего применяемой на практике является традиционная конструкция ЛЛС на базе оптико-механического сканера. Альтернативой ей является аппаратура на базе 3D Flash Ladar технологии, не имеющая подвижных частей и, соответственно, обладающая меньшими массогабаритными характеристиками при более высокой надежности.

Особенности ФПУ для 3D Flash Ladar систем

В системах управления беспилотным транспортом и мобильными роботами широко используется техническое зрение. ЛЛС являются одним из основных датчиков для контроля за окружающей обстановкой, используемых при навигации и обеспечении безопасности движения. В связи с этим, становится актуальной задача создания 3D Flash Ladar-системы силами российской промышленности из отечественных компонентов.

3D Flash Ladar системы могут быть реализованы только с использованием специального фотоприемного устройства (ФПУ), которое включает в себя двумерный массив фотодетекторов и многофункциональную интегральную схему считывания (ASIC) в виде единой сборки. Так как лазерная подсветка охватывает широкую область и отраженный сигнал распределяется на большое количество пикселей, то эко-сигнал является очень слабым и для его приема используются фотодетекторы с чувствительностью к отдельным фотонам — лавинные фотодиоды (ЛФД), работающие в режиме Гейгера (GMAPDs). Этот массив фотодетекторов работает в режиме счета фотонов, обработку сигналов осуществляет ASIC, называемая в этом случае ROIC (Readout Integrated Circuit). Интегральная схема ROIC обычно относится к одному из двух типов, определяющих характеристики ЛЛС в целом.

Первый тип основан на преобразователе времени в цифровой код (ПВЦК), а второй тип построен на базе аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

ROIC на базе ПВЦК [1–3] позволяет достигнуть высокой точности измерений на малых дальностях, а ЛЛС может быть использована для обнаружения скрытых растительностью объектов. Но при этом ФПУ не получает информации об интенсивности эхо-сигнала и будет затруднено обнаружение вторичного эхо-сигнала от нескольких объектов, расположенных один за другим (стробирование по дальности). Кроме того, ошибка измерения времени прохождения зондирующего импульса из-за ограниченной скорости нарастания и времени отклика, может ухудшить точность синхронизации.

ФПУ с ROIC на основе АЦП [4] могут извлекать больше информации из эхо-сигнала, позволяя определять материал и отражательные характеристики поверхности объекта. Однако точность данного метода определения формы сигнала зависит от частоты дискретизации, с увеличением которой возрастает потребление энергии.

Интегральные схемы ROIC производятся преимущественно по технологии 180 нм [2]. Интегральные схемы ASIC, аналогичные ROIC, применяются в блоках детектирования однофотонных эмиссионных компьютерных томографов, а также в научных приборах, предназначенных для радиационных измерений, используемых в ядерной физике.

Матрица фотодетекторов соединяется с ROIC одним из нескольких способов (прямой связью, пайкой, контактными столбами, 3D-интеграцией), затем устанавливается на термоэлектрических холодильниках Пельтье и герметизируется в вакуумированном корпусе, после чего ФПУ может быть размещено в фокальной плоскости приемной оптической системы ЛЛС.

В фотодетекторах используются кремниевые структуры и структуры InP/InGaAsP. Кремниевые фотодетекторы предназначены для ближнего ИК-диапазона длин волн, примерно до 900 нм. Фотодетекторы на InGaAs/InP применяются для длин волн 1064 и 1550 нм. Технология изготовления и конструкция ФПУ различаются при использовании этих двух полупроводниковых материалов, между которыми существует ряд ключевых различий, определяющих технологические процессы [5].

Матрица фотодетекторов на базе структуры InP/InGaAsP может освещаться через подложку, толщина которой дополнительно утончается для эффективной оптической связи с массивами микролинз. Когда матрица ЛФД InGaAsP соединена со интегральной схемой ROIC, то значительная часть подложки InP может не удаляться, так как она относительно прозрачна.

У кремниевых детекторов подложка непрозрачна и должна быть полностью удалена либо до, либо после соединения с интегральной схемой ROIC, что требует выполнения обработки тонкого (<10 мкм) слоя фотодетектора.

Заключение

Российская промышленность уже имеет опыт изготовления многорежимного аналогового ФПУ для ЛЛС на базе матрицы pin-фотодиодов 320×256 [6]. Также у отечественных разработчиков имеется задел по созданию матриц фотодетекторов с внутренним усилением и интегральных схем ASIC.

Кроме ЛЛС с широкоформатными матричными ФПУ также представляет интерес реализация конструкции гибридной схемы с одномерным сканированием и многоэлементным линейным ФПУ, что является оптимальным решением для ряда применений.

Литература

1. Eun-Gyu Lee, Jae-Eun Lee, Han-Woong Choi, Kyeong-Hyeok Lee, Bang Chul Jung, Choul-Young Kim. Low-power CMOS Frontend ROIC using Inverter feedback RGC TIA for 3-D Flash LADAR Sensor // Journal of Semiconductor Technology and Science, 2018. Vol. 18. № 1. P. 57–64. URL: <https://doi.org/10.5573/JSTS.2018.18.1.057>.
2. Song H. Avalanche Photodiode Focal Plane Arrays and Their Application to Laser Detection and Ranging. In: Chee, K., editor. Advances in Photodetectors — Research and Applications [Internet]. London: IntechOpen; 2018. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/63912>. DOI: 10.5772/intechopen.81294.
3. Takahide Mizuno, Hirokazu Ikeda, Terumasa Nagano, Takashi Baba, Makoto Mita, Yuya Mimasu, Takeshi Hoshino. Three dimensional Image Sensor with MPPC for Flash LIDAR // Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2020. Vol. 63. № 2. P. 42–49. DOI: 10.2322/tjsass.63.42.
4. Joo J.-E., Hu Y., Kim S., Kim H., Park S., Kim J.-H., Kim Y., Park S.-M. An Indoor-Monitoring LiDAR Sensor for Patients with Alzheimer Disease Residing in Long-Term Care Facilities // Sensors, 2022. 22, 7934. URL: <https://doi.org/10.3390/s22207934>.
5. Aull B. F., Duerr E. K., Frechette J. P., McIntosh A. K., Schuette D. R., Younger R. D. Large-Format Geiger-Mode Avalanche Photodiode Arrays and Readout Circuits // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018. Vol. 24. № 2. DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2736440.
6. Бурлаков И. Д., Кузнецов П. А., Мошев И. С., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. Матричный фотоприемный модуль на основе гетероструктуры InGaAs/InP для формирователей 3D изображений в коротковолновом ИК-диапазоне // Успехи прикладной физики, 2017. — Т. 5. — № 4. — С. 383–392.

УДК 621.382

Разработка навигационной СнК нового поколения**Фатеев И. А.***АО «НИИМА «Прогресс»**125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54**fateev@mri-progress.ru*

Данная работа посвящена разработке СБИС СнК, способной принимать и обрабатывать сигналы глобальных навигационных систем. СнК процессорного ядра, СОЗУ, ППЗУ, системной шины, набора интерфейсов для общения с внешними устройствами и аппаратного цифрового модуля обработки сигналов ГНСС. При проектировании СнК использовались методы понижения потребляемой энергии.

Ключевые слова: малопотребляющая схема; ГНСС; СнК.

На сегодняшний день решения, основывающиеся на ГНСС, активно применяются в различных отраслях промышленности. Они применяются в автомобильном, железнодорожном, морском и речном транспорте, в сельском хозяйстве, геодезии и многих других отраслях. На их основе строятся различные системы по сбору и анализу данных для эффективного управления хозяйствами и улучшения жизни людей.

При этом ГНСС продолжает активно развиваться, появляются новые сигналы, выводятся на орбиту более современные спутники, совершенствуются системы коррекции и поправок. Данное развитие новых систем и служб влечет за собой модернизацию радиоэлектронных модулей и элементной компонентной базы, на которую накладываются дополнительные требования по вычислительной мощности, а также требования по потреблению тока и по массогабаритным характеристикам. Таким образом, необходима разработка и создание новых ЭКБ по современным технологиям, а также необходимо развитие методов проектирования для достижения необходимых параметров микросхем и модулей.

В основе современных специализированных микросхем лежат системы на кристалле (СнК), объединяющие в своем составе одно или несколько процессорных ядер, системную шину для связи компонентов схем, блоки встроенной оперативной памяти (СОЗУ), кеш-память и ППЗУ. В специализированных микросхемах для навигации к стандартной архитектуре СнК добавляются аппаратные вычислительные модули для ускоренной обработки, что позволяет снизить требования к процессорному ядру и общей частоте системы.

С другой стороны технологии микроэлектроники развиваются через уменьшение линейных размеров транзисторов и других элементов, использование разных длин транзисторов внутри одного дизайна, создания дополнительных технологических опций — с малым и ультрамалым потреблением и уткой, а также использование различных уровней напряжения питания и т. д. Данные возможности требуют развитие подходов к проектированию, прогнозирование и учет негативных эффектов, возникающих при использовании современных технологий.

В данной работе представлен подход к проектированию навигационной СнК, разрабатываемой по технологии КМОП 22 нм с опциями низкого потребления. При разработке данной микросхемы применялись и дорабатывались подходы

к проектированию микросхем с низким потреблением питания: имплементация ячеек блокирования тактового сигнала, архитектурное выключение модулей, создание выключаемых зон, разделение переменных и другие. В результате, разработанное изделие соответствует требованиям и позволяет использовать его для построения современных навигационных модулей нового поколения.

УДК 621.391.26

Анализ помехоустойчивости радионавигационных системГлушанков Е. И.¹, Кирик Д. И.¹, Горобцов И. А.²¹ АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

193232, г. Санкт-Петербург, просп. Большевиков, 22, корп. 1

Рассматривается анализ помехоустойчивости радионавигационных систем (РНС), в которых применяются многоэлементные адаптивные фазированные антенные решетки (АФАР). В таких системах оценка энергетических показателей радиолиний по значениям отношения мощности полезных сигналов к мощности помех и шумов (или по выигрышу от адаптации) представляет собой сложную многомерную задачу, размерность которой определяется числом антенных элементов АФАР. Сокращение вычислительной сложности может быть достигнуто двумя рассматриваемыми методами. Суть первого метода заключается в построении систем сравнения меньшей размерности на основе векторных функций Ляпунова. Второй метод состоит в уменьшении размерности адаптивных пространственных фильтров. Проведен анализ помехоустойчивости РНС с помощью предложенных методов и их сравнение между собой.

Ключевые слова: помехоустойчивость; выигрыш от адаптации; адаптивные фазированные антенные решетки; системы сравнения; векторные функции Ляпунова.

Будем исследовать РНС, в которых для повышения помехоустойчивости используются АФАР. При этом оценку помехоустойчивости целесообразно проводить по энергетическим показателям, а именно по значениям отношения мощности полезных сигналов к мощности помех и шумов (ОСПШ) или по выигрышу от адаптации, определяемому как разность в ОСПШ с использованием АФАР и без нее. В любом случае вычислительная сложность такой задачи определяется величиной квадрата от числа антенных элементов АФАР, что требуется для нахождения корреляционных матриц сигналов и помех [1]. Количество антенных элементов АФАР может достигать десятков и сотен, что приводит к чрезмерно большой вычислительной сложности. Цель работы — уменьшение вычислительной сложности задачи анализа помехоустойчивости РНС с АФАР.

Рассмотрены два метода уменьшения вычислительной сложности. Суть первого метода состоит в снижении размерности линейных дифференциальных уравнений, описывающих изменение во времени элементов корреляционных матриц, на основе построенных по векторным функциям Ляпунова [2] систем сравнения на порядок меньшей размерности.

Второй метод состоит в модельном описании сигналов и помех на выходе элементов АФАР в форме стохастических дифференциальных уравнений и уменьшении размерности этих уравнений для построения пространственных адаптивных фильтров меньшей размерности.

Показано, что оба метода обладают приемлемыми для практического применения показателями по точности оценки помехоустойчивости и позволяют существенным образом уменьшить вычислительную сложность решаемой задачи. Проведен анализ методов в различных ситуациях сигнально-помеховой обстановки и сравнение их между собой.

Литература

1. Глушанков Е. И., Конторович В. Я. Анализ ЭМС в системах радиосвязи с пространственно-временной обработкой сигналов // Пространственно-временная обработка сигналов в системах радиосвязи, приложение к журналу «Радиотехника», 1991. — С. 80–85.
2. Воронов А. А. Введение в динамику сложных управляемых систем. — М.: Наука, 1985. — 352 с.

УДК 004.3

Организация мульти-протокольной подсистемы высокоскоростных интерфейсов ввода-вывода в многопроцессорных системах

Белянин И. В.*ПАО «Сбербанк России»**117997, г. Москва, ул. Вавилова, 19**ivbelyanin@sberbank.ru*

Предоставлен анализ подходов к реализации современных микропроцессорных систем. Рассмотрены варианты реализации мульти-протокольных высокоскоростных подсистем интерфейсов ввода-вывода [1] являющихся частью современных систем на кристалле (СнК). Особое внимание уделено методам построения межпроцессорных каналов обмена данными на базе данных подсистем в кеш-когерентных многопроцессорных системах с неоднородным доступом в память (ccNUMA) [2], возможности интеграции каналов в современный микропроцессор. Проведены оценки ресурсов, требуемых для реализации предложенных вариантов. Проведен анализ распространенных протоколов таких как PCIe, CXL, CCIX, UCIe для передачи данных с точки зрения применимости их для межпроцессорного обмена.

Ключевые слова: высокоскоростные интерфейсы; протокол передачи данных; СнК; ccNUMA; PCI-Express/CXL; CCIX; физические уровни.

Введение

Уровень развития микропроцессорных технологий определяет архитектуру современных вычислительных систем [4]. Широкое распространение получили многоsocketные системы с большой вычислительной мощностью и увеличенным количеством памяти, что налагает повышенные требования на подсистемы доставки данных [1, 3]. Такие подсистемы можно условно разделить на три категории (таб.1) по их применению в построении вычислительных систем [1]. Исходя из этих данных становится актуальной задача по разработке высокоскоростной универсальной подсистемы ввода-вывода.

Схема универсальной подсистемы высокоскоростного ввода-вывода

В современных многопроцессорных системах широкое распространение получил подход конфигурируемых мультипротокольных высокопроизводительных подсистем [1], которые отвечают за то, как микропроцессор взаимодействует с внешними устройствами, такими как карты расширения, свитчи или другими микропроцессорами [4]. Пример такой вычислительной системы изображен на схеме (рис. 1).

Такая подсистема закрывает как потребности взаимодействия с устройствами ввода-вывода (PCIe/CXL.io), так и реализует современный кеш-когерентные протоколы для доступа в системную память (CXL.cache) и память устройства (CXL.mem) [3]. Также универсальность такой подсистемы подразумевает, что, используя какой-либо симметричный когерентный протокол, можно реализовать объединение двух и более процессоров в единую систему по принципу кеш-когерентной системы с неравномерным доступом в память (ccNUMA) [2]. Самыми яркими приоритетными примерами таких протоколов взаимодействия являются UPI от Intel,

Таблица 1. Категории каналов передачи данных в многопроцессорных вычислительных системах [1]

Категория	Тип и возможность масштабирования	Скорость передачи данных и основные характеристики	Задержка физического уровня (Tx + Rx)
Толерантные к задержке (Узкие, очень высокая скорость передачи данных)	Сети, среда передачи данных для масштабирования дата-центров	56/112 GT/s → 224 GT/s (PAM4) 4–8 линий, используются кабели или подключение через backplane	20+ns (+ >100 FEC)
Чувствительные к задержке (широкий интерфейс, высокая скорость)	Архитектура Load/Store ввода-вывода. (PCIe/CXL/SMP cache coherency — PCIe PHY). Масштабирование в рамках платы(ноды) или стойки.	32 GT/s (NRZ) → PCIe Gen6 64 GT/s (PAM4) Порядка сотни линий суммарно, типичный линк — 16 линий, широко распространенные протоколы передачи данных. Для физического соединения используются, подключения на плате или же кабели/backplane-ы	<10ns (TX+RX: PHY -PIPE) 0–1ns FEC overhead
Сверхчувствительные к задержке (ультра-широкий интерфейс, высокая скорость)	Архитектура Load/Store и проприетарные решения	4G — 32G (single-ended, NRZ) 2D, 2.5D (→ 3D) Порядка тысяч линий, сверхнизкое потребление и высокая плотность каналов передачи данных (bandwidth per mm ²)	<2ns (PHY — Transaction Layer)

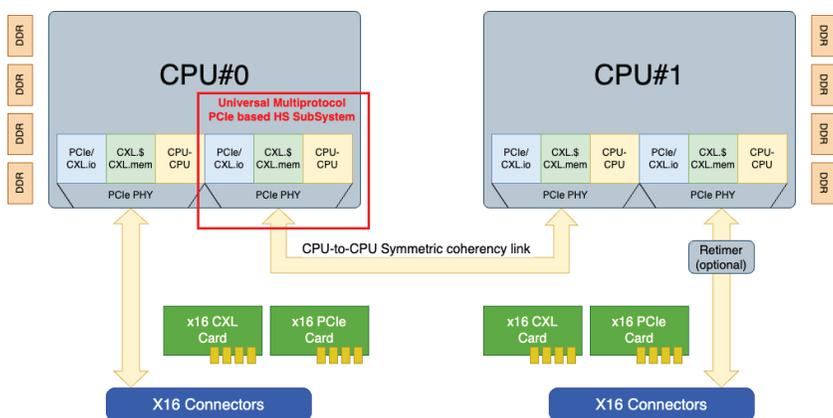


Рис. 1. Схема двухsocketной вычислительной системы с использованием мультипротокольной подсистемы ввода-вывода [1, 2]

Infinity Fabric (IFIS PHY) от AMD, также широкое применение получил открытый CCIX и другие [1, 4].

Заключение

Результатом проведенных работ стал архитектурный макет высокоскоростной подсистемы ввода-вывода с поддержкой широко распространенных протоколов PCIe, CXL и специализированного решения для реализации SMPL. Описаны протоколы и интерфейсы взаимодействия подсистемы с возможной реализацией транспортной сети данных вычислительного устройства.

Литература

1. Debendra D. S., Blankenship R., Berger D. (2024). An Introduction to the Compute Express Link (CXL) Interconnect. ACM Computing Surveys. 10.1145/3669900.
2. Kayi A., Kornkven E., El-Ghazawi T., Al-Bahra S., Newby G. Performance Evaluation of Clusters with ccNUMA Nodes — A Case Study // 10th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications, 2008. HPCC 2008. 320–327. 10.1109/HPCC.2008.111.
3. Compute Express Link Specification Revision 3.1, Version 1.0 // <https://computeexpresslink.org>. August 7, 2023.
4. Hennessy J. L. and Patterson D. A. Computer Architecture, Fifth Edition: A Quantitative Approach (5th. ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2011.

УДК 004.712

Архитектура сетевого контроллера RDMA RoCEv2 для дата-центров

Кирюшкин С. Б.

ПАО «Сбербанк России»

121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32, корп. 3, стр. А

sbkiryushkin@sberbank.ru

Рассмотрены сетевые протоколы для HPC систем (high-performance computing). Предложена архитектура сетевого контроллера RDMA RoCEv2 (Remote DMA over Converged Ethernet). Целью разработки является создание сетевых контроллеров для передачи данных с минимальной задержкой, без потерь, автономно от сру.

Ключевые слова: RDMA; RoCEv2; InfiniBand; конвергентный Ethernet; HPC.

Введение

Обмен данными в дата-центрах предъявляет ряд требований к коммуникациям: высокая скорость, низкие задержки, отсутствие потерь, низкая нагрузка на центральный процессор, масштабируемость сети. В текущее время применяется несколько протоколов обмена: InfiniBand, Ethernet, Fibre Channel. В таблице ниже представлено сравнение.

InfiniBand самый распространенный сетевой протокол, разработанный специально для дата-центров [1]. Но имеет ряд существенных недостатков: дороговизна, недоступность стандарта и IP ядер, закрытость для нашего рынка. Ethernet — открытый стандарт с доступным оборудованием, но отсутствует RDMA и минимизация задержек. Компромиссом выступает RoCEv2, развивающийся как альтернатива InfiniBand. Он позволяет заменить все сетевые протоколы ЦОД на Ethernet, что сокращает номенклатуру оборудования и стоимость обслуживания. Актуальность разработки вызвана недоступностью продуктов на рынке.

Архитектура контроллера RoCE v2

Типовой сценарий работы RoCEv2 контроллера предполагает постоянную работу сру: настройка очередей Send, Receive Queue; установка соединения Queue Pairs; синхронизация с удаленным процессором о готовности обмена; наполнение очередей заданиями WQE, ожидание исполнения заданий CQE, планировка расписания [2].

RDMA освобождает сру от пересылки данных в память, но не снимает нагрузку по управлению и синхронизации. При подключении нескольких сетевых контроллеров к одному сру нагрузка возрастает и увеличивается время реакции. 80% трафика HPC систем занимают пакеты длиной менее 16 Байт [3]. Это служебные обмены между сру по кредитам, синхронизациям и настройкам заданий пересылки, которые также нагружают коммутаторы сети.

Многие задачи HPC заранее предопределены. Это позволяет переложить нагрузку на аппаратную часть контроллера. Разработана система опроса, модификации и пересылки семафоров (синхронизаций) между удаленными узлами с помощью операций Atomic (InfiniBand) без сру. Процессор заранее заполняет очередь на отправку заданиями: пересылки данных, ожидания готовности локальных данных, модификации семафоров, отправки синхронизации удаленному узлу. Далее

вся работа выполняется на аппаратном уровне, сри получает только уведомления о завершении этапов и сообщения ошибок.

Таблица 1. Сравнение сетевых протоколов

Название	InfiniBand	Ethernet tcp/ip	Fibre Channel	RoCE v2
Описание	Для ЦОД, HPC. Удовлетворяет всем требованиям	Универсальный протокол, не подходящий для HPC	Для систем хранения данных	InfiniBand транспортного уровня поверх Ethernet L4 (UDP)
Скорость, Gbit/s	400	800	128	800
Задержки	мин	макс	мин	мин
Нагрузка сри	мин	макс	мин	мин
DMA	+	–	+	+
Доступность	Закрытый, не общепринятый стандарт. Ограниченные производители, нет IP ядер	Открытый стандарт, доступно сетевое оборудование, IP ядра	Закрытый, слабо развивающийся стандарт. Ограниченные производители	Ethernet открыт, RDMA часть InfiniBand закрыта. Доступность сетевого оборудования. Мало IP ядер
Недостатки	В стандарте много пробелов ведут к аппаратной несовместимости производителей. Закрытость, высокая цена.	Медленный, тройное копирование данных, нет DMA	Слабая поддержка, закрытость стандарта	Те же, что у InfiniBand

Заключение

Доработанная архитектура снимает нагрузку на сри, уменьшает задержку взаимодействия контроллера с процессором при ожидании синхронизации. При этом не нарушается общая концепция протокола RoCEv2. Предполагается проверка архитектуры на ПЛИС.

Литература

1. Nvidia. Accelerating the TOP500 Supercomputers. The Interconnect View on the TOP500 Supercomputers. Nov., 2023.
2. InfiniBandSM Trade Association // InfiniBandTM Architecture Specification Volume 1. Release 1.7. July 11, 2023. URL: https://cw.infinibandta.org/site/login?return=%2Fwg%2FMembers%2Fhome%2FMember_Specifications (дата обращения: 18.12.2023).
3. Huawei // HPC Lossless Ethernet and AI Fabric Network Technical. White Paper. November 10, 2023. URL: <https://e.huawei.com/en/material/enterprise/2698631dcfc14f468f7988bba2f5e722>. (дата обращения: 07 05 2024).

УДК 004.415

Интеграция программных моделей производительности с верификационными стендами

Крюков П. И.^{1,2}, Гаращенко А. В.^{1,3}, Ладин О. И.¹

¹ ПАО «Сбербанк России»

121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32кА

PKryukov@sberbank.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе рассматривается расширение предложенных ранее средств модульного тестирования моделей производительности адаптером, использующим DPI для подключения к верификационным испытательным стендам. Полученный адаптер может быть использован для решения широкого класса задач, что открывает возможности к использованию процессов разработки, совмещающим черты каскадного и итеративного подходов.

Ключевые слова: Asim; C++; модульное тестирование; TDD; UVM; верификация; DPI.

Рассмотрение моделей производительности вычислительных систем как программного обеспечения поднимает вопрос организации их тестирования [1]. Успешное прохождение этого этапа развития модели требует доказательств не только соответствия модели требованиям функциональной корректности, но и приближения производительности моделируемой системы с установленной точностью [2].

При каскадном прохождении этапов развития тестирование осуществляется после завершения разработки всей модели, интеграции всех составляющих ее компонент. Стандартным приемом является регрессионная верификация, «сверху вниз»: производится запуск задачи на модели, и на основании сравнения результата с эталонным выводом производится поиск компоненты, содержащей ошибку. Этот процесс трудозатратен, а также требует от разработчика моделей понимания работы многих компонент и системы в целом.

Итеративная разработка полагается на модульное тестирование, которое осуществляется по принципу «снизу вверх» [3]. Этот подход, с одной стороны, упрощает локализацию проблем, а также позволяет начать тестирование раньше, реализуя подход «shift-left»; с другой стороны, он имеет и ряд недостатков. Во-первых, это трудозатраты на написание большого количества модульных тестов и их организацию в наборы, а во-вторых, отсутствие гарантии покрытия этими тестами всего специфицированного поведения моделируемой системы. Строго говоря, модульное тестирование не является верификационной методологией.

Тем не менее, было показано, что модульное тестирование моделей производительности может быть организовано образом, подобным универсальной верификационной методологии (UVM) путем внедрения особых модулей: генераторов тестовых сигналов и их приемников [4]. Таким образом, при синтезе обеих методологий может быть получена третья, наследующая от «родительских» необходимый для решения задач набор свойств.

Задача интеграции UVM и модульного тестирования может быть решена использованием паттерна программирования «адаптер»: для моделирования производительности аппаратные интерфейсы UVM соединяются с примитивами портов фреймворков моделирования Asim, Gem5, Sparta либо подобных, а функциональная корректность обеспечивается преобразованием данных во внутреннее представление модели. При этом верификационные испытательные стенды пишутся на языках описания аппаратуры, таких как SystemVerilog, а модульное тестирование — на языке модели (как правило, C++), соответственно, адаптер должен использовать технологию Direct Programming Interface (DPI) [5]. Принципиальная схема адаптера представлена на рис. 1.

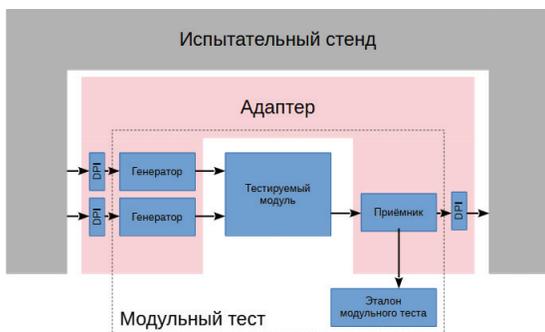


Рис. 1. Адаптер между классами модульного тестирования и испытательным стендом

Полученный адаптер может быть использован несколькими способами: размещение модели внутри испытательного стенда позволяет использовать ее как эталонное решение для последующих шагов разработки; размещение модели на испытательном стенде позволяет проводить ее верификацию по принципам UVM; исследование нескольких моделей на одном испытательном стенде позволяет проводить их сравнительный анализ. Широкий выбор способов интеграции верификации и модульного тестирования позволяет применить необходимый баланс между надежностью каскадных процессов разработки и гибкостью итеративных.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010. Информационная технология (ИТ). Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств.
2. Akram A., Sawalha L. A Survey of Computer Architecture Simulation Techniques and Tools // *IEEE Access*, 2019. Vol. 7. P. 78120–78145.
3. Khorikov V. *Unit Testing Principles, Practices, and Patterns*. 1st ed. Manning, 2020.
4. Крюков П. И., Ладин О. И., Королев К. А. Расширение моделей производительности средствами модульного тестирования // *Наноиндустрия*, 2024. — Т. 17. — № 10. — С. 847–851. DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.10s.847.851.
5. Wang X., Ruan H., Zou L. Exploration of Using Direct Programming Interface to Improve the Reusability of Verification IP // *2022 7th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM)*, Xi'an, China.



УДК 004.415

Построение оптимизированной программной модели комплексных вычислительных систем

Ладин О. И.^{1,2}

¹ ПАО «Сбербанк России»
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32кА
OILadin@sberbank.ru

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Предложен подход построения оптимизированной модели симулятора комплексной вычислительной системы с требуемым уровнем компромисса между точностью и скоростью симуляции для нужд оптимизации ПО, предназначенного для высокопроизводительных систем. Для различных вариантов модели приведены характеристики скорости и точности моделирования.

Ключевые слова: программное моделирование; высокопроизводительные системы; Gem5.

Оптимизация ПО, предназначенного для высокопроизводительных систем, требует инструментария профилирования целевой системы, с помощью которого возможна оценка метрик эффективности разработанных компонент ПО. Отладка и оптимизация непосредственно на целевой системе имеют следующие трудности: интерфейс профилировщика как правило ограничен, невозможно получить исчерпывающий набор данных о всех аспектах работы системы. Кроме того, может возникнуть необходимость в создании и оптимизации ПО в отсутствие подлежащего аппаратного обеспечения: как из-за отсутствия компонент, так и из-за неопределенности в выборе удовлетворяющих аппаратных решений среди ряда вариантов.

Для таких случаев удобно использовать программную модель целевой системы — симулятор, который позволит оценить эффективность работы программно-аппаратного комплекса. Симуляторы характеризуются точностью, скоростью работы и масштабируемостью. В зависимости от уровня детализации симуляторы могут быть функциональными, событийными и потактовыми [1]. Для задач оптимизации ПО уровня детализации функционального симулятора недостаточно, поскольку требуется дополнительная статистика о производительности, свойственная выводу потактовых симуляторов.

Однако, всех деталей потактовых симуляторов не требуется — они сложны и, как правило, медленные, что не позволяет использовать полноценные программы для анализа. Более того, часто потактовые модели опираются на языки описания аппаратуры (System Verilog), что вносит ограничения на интеграцию с традиционными средствами разработки и анализа ПО. Оптимальным является выборочная компоновка полного симулятора системы из более и менее точных компонент, который будет иметь нужный уровень детализации в каждом узле. Правильный выбор уровня детализации — открытая проблема.

Целью данной работы является поиск компромиссного решения между точностью моделирования и скоростью работы симулятора системы. В качестве базового фреймворка был выбран открытый симулятор системного уровня Gem5 [2],

имеющий обширную базу компонент и позволяющий гибко настраивать эти компоненты. В результате получен ряд моделей вычислительной системы с различными вариантами моделей компонентов — центрального процессора, памяти, ускорителей. Для каждой модели вычислены характеристики скорости и точности моделирования. Оценена применимость полученных моделей для нужд оптимизации ПО.

Литература

1. Cai Lukai and Gajski Daniel Transaction Level Modeling: An Overview // Hardware/Software Codesign and System Synthesis, 2003.
2. Lowe-Power J. et al. The gem5 Simulator: Version 20.0+. URL: <https://www.gem5.org>.

УДК 538.91

Выбор QEMU как среды для создания виртуальных прототипов устройств в рамках реализации модели разработки «Сдвиг влево» / «shift-left»

Ларионов А. А.

ПАО «Сбербанк России»

117997, г. Москва, ул. Вавилова, 19

AAnLarionov@sberbank.ru, larionov.andre@inbox.ru

Без использования эмуляторов устройств для будущих аппаратных платформ невозможно реализовать методологию «shift-left» / «Сдвиг влево» при разработке ПО в программно-аппаратном проекте, что отрицательно сказывается на сроках и стоимости. Предлагается использовать QEMU для ускорения pre-silicon разработки ПО, в первую очередь для драйверов.

Ключевые слова: QEMU; Pre-Silicon development; shift-left; simulation; DMA; KMD; моделирование; разработка драйверов.

В современных проектах по созданию аппаратуры время и стоимость разработки сопутствующего ПО (прошивки, драйвера, высокоуровневые пользовательские приложения) составляет большую часть расходов, и по времени и финансам.

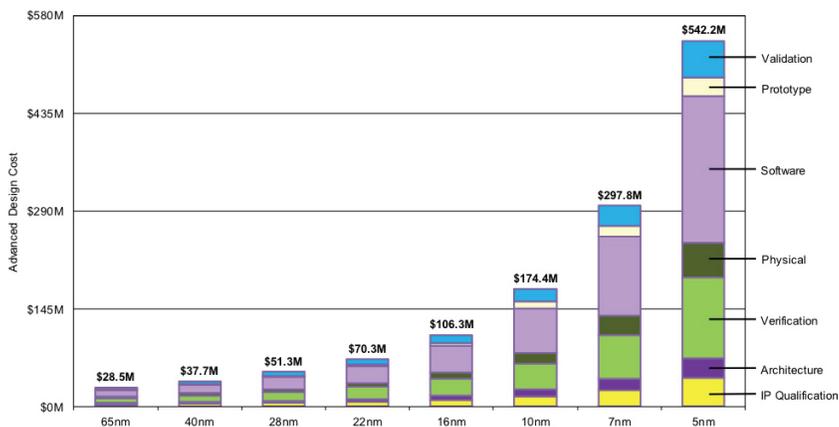


Рис. 1. Рост стоимости разработки ПО (и его вклад в общую стоимость продукта)

Один из вариантов уменьшения сроков и стоимости разработки ПО — это использование симуляторов и эмуляторов устройств для будущих аппаратных платформ. Без их использования невозможно реализовать методологию «shift-left» / «Сдвиг влево» при разработке ПО в программно-аппаратном проекте, что отрицательно сказывается на сроках и стоимости всего проекта. Но выбор подходящего для проекта симулятора/эмулятора так же не совсем тривиальная задача в текущих условиях.

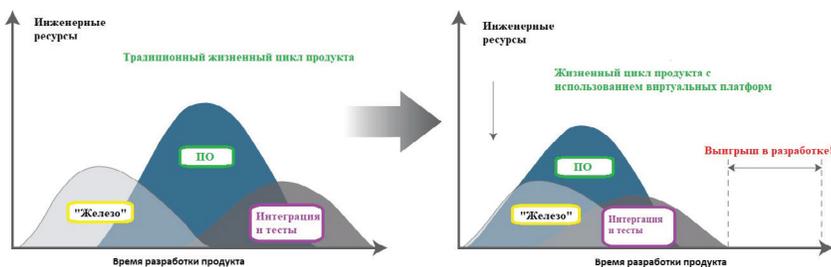


Рис. 2. Выигрыш времени при разных моделях разработки продукта

Вопросы выбора симулятора/эмулятора устройства для использования в проекте по созданию аппаратных средств крайне слабо освещены в работах отечественных авторов (к сожалению, сказывается узость рынка аппаратных решений). В зарубежной литературе ситуация намного лучше, см., например, [1] или [2].

В данной статье предлагается рассмотреть выбор симулятора/эмулятора устройства на основании следующих критериев: (1) доступность, (2) open-source, (3) дешевизна использования и поддержки и (4) скорость.

Несмотря на то что, крупнейшие компании производящие аппаратные решения предпочитают использовать симуляторы внутренней разработки, для небольших компаний и startup'ов доступна возможность использования коммерческих решений. Наиболее яркий пример это Simics [3] от компании Intel/WindRiver. Менее известен продукт QBox от www.machineware.de [4]. К сожалению, это хоть и коммерческие, но close-source продукты, которые не доступны в данный момент на российском рынке из-за санкционных и прочих экспортных ограничений.

Open-source эмуляторы выигрывают у close-source в плане доступности — доступ к ним намного тяжелее заблокировать. Но выбор более ограничен, широко используется два, QEMU [5] и GEM5 [6].

Особого смысла подробно останавливаться на том, что такое QEMU нет. В данный момент это один из самых популярнейших эмуляторов аппаратного обеспечения различных архитектур и платформ с открытым исходным кодом. GEM5 тоже широко известен, более в академических кругах, и в первую очередь используется для исследований новых компьютерных архитектур и наборов инструкций.

QEMU намного более распространен в использовании. На нем можно легко запустить операционную систему с ядром Linux и оперативно выполнить многие задачи по симуляции и тестированию. Но как только задачи минимально выходят за рамки стандартных, готовой функциональности QEMU «из коробки» уже недостаточно. Набор периферийных устройств в QEMU большой, но, если создается что-то новое, все равно получается недостаточный. Если готовых устройств/моделей устройств в QEMU нет — придется расширить функционал QEMU; написать свои модели, изменения и расширять код самого QEMU. К сожалению, у QEMU нет модулей/плагинов (большой контраст архитектурой ядра Linux).

Найти и нанять людей (или их быстро обучить) в случае QEMU намного проще, чем при использовании GEM5.



QEMU в KVM режиме работает намного более быстро, чем GEM5. (Хотя скорость работы во многом определяется используемыми библиотеками симуляции устройств)

В низкоуровневом техническом плане сравнение и QEMU vs. GEM5 выглядит следующим образом:

1. QEMU быстрее чем GEM5.
2. QEMU использует GPL, GEM5 BSD лицензию.
3. Gem5 сложнее, его труднее модифицировать и поддерживать. Сложный Python-интерфейс, который в значительной степени генерируется автоматически. Это затрудняет настройку IDE для разработки gem5. Слабая поддержка от community.
4. GEM5 обеспечивает более реалистичное моделирование доступа к DRAM-памяти с задержками, кешами и манипуляциями с таблицей страниц. Это позволяет использовать API ядра Linux, которые очищают кеш-память, например, DMA операции с периферийными устройствами, что очень важно для разработки драйверов. (В QEMU драйвер будет работать, даже если кеш не очищен корректно.

Таким образом, QEMU представляется лучшим выбором, чем GEM5 за счет (1, 2, 3) в списке выше.

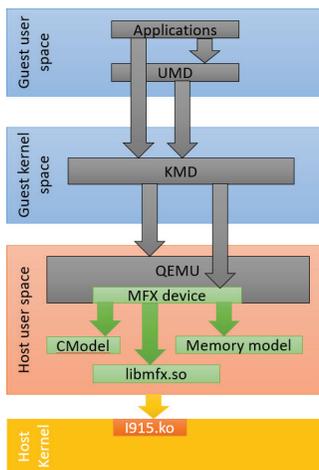


Рис. 3. Блок диаграмма вызовов для виртуального устройства видео декодирования в QEMU (пример)

Вовремя создания программно-аппаратного продукта, при реализации модели разработки «Сдвиг-влево»/«Shift-Left», использование симуляторов и эмуляторов устройств в проекте строго необходимо.

Выбор QEMU для pre-silicon разработки драйверов (и любого низкоуровневого ПО) является достаточно хорошим вариантом и отличной альтернативой коммерческим продуктам, например, таким как Simics или QVox.

Показано, что создание виртуальных прототипов устройств в QEMU позволяет:

1. Начать раннюю разработку драйверов даже в отсутствии реального «железа» / «устройства» или его FPGA прототипа.
2. Качественно и быстро оттестировать работу UMD/KMD драйвера, а именно:
 - работа с регистрами устройства;
 - работа с DMA;
 - работа с прерываниями.
3. Добавить виртуальному устройству необходимую функциональность. Например, видео кодирование или декодирование — посредством вызова сторонней библиотеки из самого QEMU.
4. Немаловажным является и тот факт, что использование QEMU позволяет обучить молодых инженеров основам разработки драйверов устройств.

Литература

1. Daniel Aarno, Jakob Engblom. Software and System Development using Virtual Platforms. Full-System Simulation with Wind River Simics. O'REILLY, 2014. ISBN: 9780128007259.
2. Open Source Virtual Platforms for SW Prototyping on FPGA based HW. DVCon India 2019. URL: <https://dvcon-proceedings.org/wp-content/uploads/open-source-virtual-platforms-for-sw-prototyping-on-fpga-based-hw.pdf> (accessed: 10.07.2024).
3. Official site of Simics. URL: <https://www.windriver.com/products/simics> (accessed: 10.07.2024). URL: <https://intel.github.io/tsffs/simics/> (accessed: 10.07.2024).
4. Official site of QBox. URL: <https://www.machineware.de/pages/products.html> (accessed: 10.07.2024).
5. Official site of QEMU. URL: <https://www.qemu.org/docs/master/system/device-emulation.html> (accessed: 10.07.2024).
6. Official site of GEM5. URL: <https://www.gem5.org/> (accessed: 16.04.2024).



УДК 004.053

Метод выбора параметров при синтезе системы управления РТК на основе многоверсионного моделирования

Суминов К. А.

ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»

119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24

Konstantin.A.Suminov@mcst.ru

В данной статье представлен пример разработки комплексного моделирующего стенда для симуляции основных процессов робототехнических комплексов (РТК) с применением многоверсионного программирования. Описаны структура стенда и функциональные зависимости его компонентов. Проведенные на стенде эксперименты продемонстрировали, что использование многоверсионных наборов библиотек и комплексных моделей позволяет синтезировать программы, оптимизированные по заданным параметрам (таким как точность и вычислительные ресурсы), в зависимости от конкретных условий или архитектуры вычислительной системы. Это также предоставляет возможность моделировать различные сценарии для определения оптимальных решений и структур РТК в специфических условиях, обеспечивая адаптацию поведения к изменяющимся внешним факторам.

Ключевые слова: выбор параметров; системы управления; многоверсионное моделирование; РТК; моделирование роботов; бортовые вычислительные системы.

Развитие робототехники стремительно прогрессирует, что обусловлено повсеместной востребованностью робототехнических комплексов (РТК) в различных прикладных задачах. Современная техника всех видов, включая РТК, активно развивается, особенно в области бортовых вычислительных комплексов (ВК) и систем управления (СУ). Для решения актуальных задач РТК становятся все более автономными, переходя от дистанционного управления к полу- и полностью автономным системам, что неизбежно приводит к усложнению всех их компонентов.

Интеллектуальные системы управления (ИСУ) базируются на мощных вычислительных системах, способных выполнять множество сложных задач в реальном времени. Такие задачи, как распознавание образов, семантическая сегментация изображений, сопровождение объектов, навигация на местности, построение карт и другие, являются неотъемлемой частью современных РТК и становятся все более сложными с точки зрения вычислений. Это существенно усложняет разработку РТК, повышая требования к качеству и полноте моделирования, и требует создания комплексных моделирующих стендов, что является одним из актуальных направлений исследований.

Большинство задач РТК можно решить разными способами, используя различные методы и подходы. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества в зависимости от условий эксплуатации РТК. Для достижения высоких показателей качества работы РТК в СУ необходимы наиболее оптимальные алгоритмы для каждой конкретной ситуации. Интеллектуальные СУ (ИСУ) должны адаптироваться к меняющимся условиям окружающей среды, обеспечивая наилучшее решение на протяжении всего времени выполнения задач. В процессе функционирования

РТК необходимо выбирать алгоритмы, устанавливая критерии приоритета в зависимости от доступных ресурсов и сложившейся ситуации.

Также важно учитывать, что при изменении условий эксплуатации (погода, ландшафт, требования по надежности) или в случае выхода из строя вычислительного модуля, необходимо проводить повторный синтез системы управления, возможно изменяя приоритеты критериев.

В данной статье представлен пример создания комплексного моделирующего стенда для моделирования основных процессов РТК с использованием многоверсионного программирования. Описана структура стенда и функциональные зависимости его компонентов. С использованием стенда проведен эксперимент, который показал, что создание многоверсионных наборов библиотек и комплексных моделей позволяет синтезировать программы, оптимальные по выбранным параметрам (точность, вычислительные ресурсы и т.д.) в зависимости от заданных условий или архитектуры вычислительной системы. Это также позволяет моделировать определенные сценарии для определения оптимальных решений и структур РТК в конкретных условиях, обеспечивая возможность адаптации поведения к изменяющимся условиям окружающей среды.

На основе проведенных экспериментов автором предложен метод выбора параметров при синтезе системы управления РТК, позволяющий поддерживать оптимальность систем управления по заданному критерию.

Литература

1. Романов А. М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 1. Промышленная робототехника // *Russian Technological Journal*, 2019. — № 7 (5). — С. 30–46. — URL: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-30-46>.
2. Бочаров Н. А. Исследование подходов к унификации бортовых вычислительных комплексов // *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2023. — № 1 (231). — С. 275–287. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-275-287.
3. URL: <http://www.mcst.ru/e4c-com> (дата обращения: 10.06.24).
4. URL: <http://www.sm1820.ru/2021/12/10/e2c3-com> (дата обращения: 10.06.24).
5. Бочаров Н. А. Парамонов Н. Б., Славин О. А. Суминов К. А. Математические и программные модели задач технического зрения робототехнических комплексов на основе микропроцессоров «Эльбрус» // *Труды Института системного программирования РАН*, 2022. — № 34 (6). — С. 85–100. — URL: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34\(6\)-6](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(6)-6).
6. Wicker D., Rizki M. M., Tamburino L. A. E-Net: Evolutionary neural network synthesis // *Neurocomputing*, 2002. Vol. 42. № 1–4. P. 171–196.

УДК: 004.027

Методы и подходы создания высокопроизводительного параллельного потокового процессора для решения задач со сложноорганизованными данными

Бобков С. Г.^{1,2}, д. т. н., Левченко Н. Н.¹, к. т. н.

¹ НИЦ «Курчатовский институт»

Курчатовский комплекс НБИКС — природоподобных технологий

Отделение проблем проектирования в микроэлектронике

124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3

nick@ippm.ru

² ООО «Конструкторское бюро «Компьютерные технологии и системы»

117246, г. Москва, Научный проезд, 19

s_g_bob@mail.ru

Разработаны методы и подходы создания высокопроизводительного параллельного потокового процессора для решения задач со сложноорганизованными данными. Приведены структурные схемы потокового процессора и варианты его адаптации под задачи.

Ключевые слова: параллельный потоковый процессор; сложноорганизованные данные; потоковая модель вычислений.

Повышение производительности вычислительных систем за счет увеличения числа ядер имеет существенное ограничение для большинства актуальных задач. При превышении некоторого числа ядер в системе падает коэффициент загрузки каждого процессора и, соответственно, реальная производительность всей системы. Проблема усугубляется, если в задаче присутствует активная работа с глобальными или сложноорганизованными данными.

Одним из вариантов решения проблемы падения реальной производительности и преодоления трудностей параллельного программирования является переход к нетрадиционным моделям вычислений и реализующим их архитектурам. Для решения возникающих проблем предлагается потоковая модель вычислений с динамически формируемым контекстом (dataflow), в которой уже встроена функция организации параллельных вычислений на сотни и тысячи вычислителей.

Потоковая модель вычислений с динамически формируемым контекстом функционирует в рамках парадигмы «раздачи». Суть парадигмы «раздачи» состоит в том, что инициатива в деле передачи данных принадлежит тому вычислительному узлу, который породил данные, а не тому, кто в них нуждается (узел-источник сам «знает» (вычисляет) адреса всех потребителей, на которые и рассылает свой результат, что облегчает работу аппаратуры при распределенном выполнении). Это обеспечивает одновременное и параллельное выполнение экземпляров программы узла над данными, которые имеют разный контекст. Для программирования в этой модели вычислений создан параллельный язык DFL.

Потоковая модель вычислений реализуется в архитектуре потокового процессора, который обеспечивает аппаратную поддержку распределению вычислений по имеющимся аппаратным ресурсам (на сотни и тысячи вычислителей). Поскольку архитектура потокового процессора позволяет гибко использовать синхронные

и асинхронные блоки в своем составе, то важнейшей методикой создания таких процессоров является разложение потокового процессора на отдельные блоки и оценка эффективности организации вычислений в синхронном или асинхронном режиме.

При выполнении различных программ на эмуляторе процессора получены данные, позволяющие судить о высокой эффективности потокового процессора на задачах нерегулярной структуры, таких как работа с разреженными массивами, обработка графов нерегулярной структуры, математические модели с нерегулярными, многомасштабными, адаптивными сетками и др. Производительность потокового процессора на данных задачах превышала производительность универсальных процессоров компании Intel до 10 раз при условии отсутствия задержек в потоке данных с датчиков. Для выполнения данного условия предполагается использовать последовательный интерфейс от 32/64 входных источников данных. Также возможно увеличение входного потока данных за счет использования интерфейса PCIe, объединяющего несколько микросхем потокового процессора или источников данных с выходом на PCIe и подключения дополнительных потоков данных.

Еще одной особенностью организации вычислений является синхронизация событий по приходу данных. В существующих системах обработки большого потока гидроакустических, радиолокационных и пр. данных требуется четкая синхронизация вычисления данных. В случае с предлагаемыми потоковыми процессорами вычислительная часть синхронизируется автоматически по приходу данных в соответствие с программой. Также отпадает необходимость в предварительном упорядочивании данных для организации непрерывного потока вычислений, что в современных системах является одной из наиболее трудоемких задач. Кроме того, существенно облегчается вопрос изменения распределения вычислений, поскольку оно отделено от самой параллельной программы.

Литература

1. Стемпковский А. Л., Бобков С. Г., Змеев Д. Н., Левченко Н. Н., Климов А. В. Автоматизированное определение оптимальной конфигурации параллельной потоковой вычислительной системы для решения конкретной задачи // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС), 2021. — Вып. 3. — С. 82–93. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-3-82-93.



УДК 621.3.049

Процессорные сложнофункциональные блоки с последовательным исполнением команд втоого поколения

Козлов А. В.

ООО «Клаудбейр»

196006, г. Санкт-Петербург, ул. Цветочная, 18, лит. 3

alexander.kozlov@cloudbear.ru

Разработано 2-е поколение процессорных ядер с последовательным исполнением на базе системы команд RISC-V. Описаны микроархитектурные подходы, примененные для увеличения производительности. Приведены результаты производительности на стандартных тестах, а также результаты физической имплементации в технологии СБИС.

Ключевые слова: RISC-V; IP-блоки; процессоры; микроархитектура.

На сегодняшний день процессоры с последовательным исполнением команд продолжают часто применяться в системах на кристалле, которые используются в системах с низким энергопотреблением. При этом решается задача максимизации производительности на единицу площади кристалла.

Компанией CloudBEAR были разработаны процессорные ядра 2-го поколения VI-652 с поддержкой ОС Linux, а также BR-352, BR-652 — для встраиваемых систем. По сравнению с 1-м поколением были переработаны и улучшены подсистема предсказания ветвлений, подсистема выполнения команд чтения/записи, использованы приемы в подсистеме исполнения команд, позволяющие увеличить производительность.

В докладе будут представлены микроархитектурные особенности данных процессорных ядер, результаты тестов производительности Coremark, Dhystone, Linpack, Whetstone, SPEC2006, SPEC2017, а также результаты физической имплементации ядер на технологиях СБИС.

УДК 519.6

Реализация проверки правил проектирования с применением гетерогенной вычислительной системы**Васюткин А. О., Смирнов Ю. В.***ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»**119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24**smirnov_y@ineum.ru, vasutkin_a@ineum.ru*

Разработан модуль проверки правил проектирования на основе совместного использования классических алгоритмов и алгоритмов преобразованных для вычислений на устройствах с поддержкой OpenCL.

Ключевые слова: вычислительная геометрия; проверка правил проектирования; вычисления на GPU.

Проверки правил проектирования в основной своей массе опираются на решение задач вычислительной геометрии в области нахождения расстояний между объектами на плоскости, данный тип задач давно известен и разработаны стандартные методики повышения эффективности данных алгоритмов с понижением класса сложности задачи от $O(n^2)$ до $O(n \log n)$. Однако в случае, когда одновременно появляются несколько дополнительных требований к задаче проверки: несколько десятков правил, достаточно значительное количество проверяемых объектов (порядка 10^{12}), и требование завершения проверки во временных диапазонах близких к задачам реального времени (не более 3х секунд от запроса на пользователя, до вывода обработанных данных), возникает потребность иного подхода к решению данной задачи.

В докладе будет рассмотрен механизм реализации решения данной задачи на основе гетерогенных вычислений с использованием системы из CPU и GPU, опирающийся на сильные и слабые стороны данных вычислительных узлов. Будут обсуждены основные идеи трансформации алгоритмов в условиях вышесказанных ограничений и рационального использования вычислительных ресурсов. Будет приведен пример реализации алгоритма проверки правил проектирования.

Исследования проведены с использованием вычислительных мощностей ПАО «ИНЭУМ им. Брука».



УДК 538.91

Применение методов машинного обучения для ускорения достижения требуемого покрытия при функциональной верификации

Манеркин А. Д., Гревцев Н. А., к. т. н. Чибисов П. А.

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

ngrevcev@cs.niisi.ras.ru

В статье обосновывается применимость методов машинного обучения для функциональной верификации на модульном уровне. Реализована модель сбора функционального покрытия для обучения нейронной сети с использованием UVM. Предложена модель обучения, позволяющая быстрее достигать требуемого уровня функционального покрытия при использовании генератора параметров транзакций на основе метода градиентного бустинга по сравнению с псевдослучайной генерацией данных параметров.

Ключевые слова: функциональная верификация; UVM; машинное обучение; градиентный бустинг.

В связи с ростом сложности микропроцессоров и их специализацией в зависимости от нужд потребителей возникает необходимость производить регулярное регрессионное тестирование разрабатываемых устройств. При большом количестве многократно запускаемых тестов данный тип тестирования в рамках функциональной верификации занимает все больше временных и машинных ресурсов. Важнейшей метрикой функциональной верификации является уровень функционального покрытия состояний тестируемого устройства (DUT, Device Under Test) стимулами. Стопроцентное покрытие DUT свидетельствует о достижении всех требуемых состояний при функциональной верификации.

Наиболее распространенным методом определения параметров стимулов является их псевдослучайная генерация. Однако данный метод не является оптимальным, поскольку значительная часть транзакций не переводит DUT в ранее непокрытые состояния [1]. Особенно сложными являются состояния DUT, для покрытия которых требуется транзакция или комбинация транзакций с конкретными заранее неизвестными параметрами. Вопрос выбора релевантных входных стимулов для минимизации времени тестирования является одним из ключевых в коммерческих и научных проектах.

В рамках предыдущей работы авторов рассмотрен широкий спектр применения методов машинного обучения в различных областях верификации микропроцессоров [2]. В данной статье на примере контроллера памяти DDR3 разработана система генерации параметров транзакций на основе метода градиентного бустинга. Приводится обоснование выбора DUT, при верификации которого будет оправдан переход от метода алгоритмической или псевдослучайной генерации к методу генерации на основе машинного обучения. В качестве метода машинного обучения выбран относительно простой и эффективный метод градиентного бустинга. Предложен способ корректной оценки и репрезентации тестовых последовательностей,

подходящий для построения таблицы при обучении с помощью градиентного бустинга.

Применение описанного метода позволило существенно ускорить процесс достижения целевого покрытия по сравнению с псевдослучайной генерацией стимулов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2024-0003.

Литература

1. Hughes W., Srinivasan S., Suvarna R., Kulkarni M. Optimizing Design Verification using Machine Learning: Doing better than Random, 2019.
2. Гревцев Н. А., Манеркин А. Д., Чибисов П. А., Применимость методов машинного обучения для тестирования моделей микропроцессора // Труды научно-исследовательского института системных исследований российской академии наук, 2023. — № 4. — Т. 3. — С. 97–104.



УДК 621.3.049.77

Анализ архитектурных решений для со-процессора PKI

Сагитов А. В., Теленков В. В.

ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а

info@nm-tech.org

В работе рассматриваются различные способы реализации сопроцессора PKI. Приводятся их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: датчик защитной сетки; безопасность; внешний механический доступ.

В современных реалиях существует потребность в вычислении чисел, разрядность которых превышает разрядность систем в разы. Для решения этой проблемы существует сложно функциональный блок со-процессор PKI — Public Key Instruction (Инфраструктура открытых ключей). В задачи этого блока входит вычисление чисел большой разрядности, например: есть число А и число В где разрядность каждого числа составляет 512 бит, и провести арифметические операции используя SoC вызывает затруднения. Такие случаи встречаются достаточно часто при вычислении эллиптических кривых и в функциях хеширования, а также для решения других криптозадач.

Для аппаратной реализации этого сложно функционального блока обычно используют систему, реализованную на конечных автоматах. Преимущество этой реализации — малое количество тактов на выполнение одной операции, в среднем на операцию арифметического сложения необходимо 27 тактов. Недостатком данной реализации является большая площадь, занимаемая этим сложно функциональным блоком. Исходя из этого задача разработки принципиально отличающегося аппаратно-программного комплекса PKI является актуальной. Для решения данной задачи было принято решение применить «Генератор мнемонического кода» задача которого исполнять мнемонический код, который и осуществляет работу всего сложно функционального блока. В состав этого PKI входит несколько арифметико-логических устройств (АЛУ), с определенным списком операций, и блок оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) для хранения промежуточных вычислений.

Был продан комплекс работ для выявления оптимального состава блока, в том числе определение аппаратных компонентов и написание псевдокода (мнемонического кода). Для мнемонического кода была разработана система команд, позволяющая управлять внутренними компонентами сложно функционального блока, эти команды подаются на транслятор мнемонического кода и псевдокод переходит в битовое представление и, таким образом, хранится в памяти команд. Последовательность работы разработанного сложно функционального блока, следующая при появлении внешнего воздействия на «Генератор мнемонического кода», определяет какую команду необходимо исполнить. Из регистров вычитывается информация о переменных, таких как длина и базовый адрес, далее следует последовательное исполнение мнемонических команд, в результате чего получаем конечное число, которое является результатом операции.

Нам удалось создать работоспособный РКІ со значительным снижением занимаемой площади по сравнению с реализацией на конечных автоматах, но при изменении самой структуры блока также изменилось количество тактов на выполнение операции, вот некоторые сравнения, например операция арифметического сложения которая выполнялась за 27 тактов, выполняется за 438 тактов, заметно ухудшение в скорости выполнения операции примерно в 16 раз, но в противовес этого количество тактов для выполнения арифметического деления снизилось с 116848 тактов до 3000 тактов, что быстрее примерно в 39 раз.

УДК 621.3.049

Вычисления с применением операций на эллиптических кривых на основе ПЛИСТурбин Д. С.^{1,2}, к. т. н. Краснюк А. А.^{2,3}¹ АО «ЭНПО СПЭЛС»115409, г. Москва, Каширское ш., 31
dstur@spels.ru² ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

НИЦ «Курчатовский институт»

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

aakr@cs.niisi.ras.ru

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

aakrasnyuk@mephi.ru

Проведен анализ алгоритмов быстродействующего умножения и деления для арифметики полей Галуа GF(2^m) на примере вычислений эллиптических кривых с возможностью аппаратной интерпретации оптимизированного алгоритма с использованием ПЛИС.

Ключевые слова: алгебра Галуа; система остаточных классов; эллиптические кривые.

Введение

Одним из основных ограничений энергоэффективности алгоритмов защиты и преобразования данных, распознавания образов для нейро-систем и систем искусственного интеллекта, цифровой фильтрации изображений и извлечения признаков, расчета траекторий и маршрута движения автономного транспорта является высокая вычислительная сложность дискретных ортогональных преобразований [1]. Алгоритмы быстродействующего умножения и деления для арифметики полей Галуа GF(2^m) широко известны и применимы как в сетях передачи данных как с использованием кодов Рида — Соломона, так и в криптографических алгоритмах, например, AES (Advanced Encryption Standard). При аппаратной реализации устройств, работающих на традиционных принципах гарвардской архитектуры, возникает необходимость в построении модулей для быстрого умножения больших многочленов. Используя для этой цели систему остаточных классов (СОК), китайскую теорему об остатках и связанную с ней полиадическую систему счисления, существует возможность замены вычисления произведений больших многочленов параллельным умножением значительно меньших многочленов. Частным случаем применения алгебры и полей Галуа являются вычисления с применением операций на эллиптических кривых. Аппаратная интерпретация данных алгоритмов на основе ПЛИС представляет интерес для широкого круга задач, решаемых энергоэффективными автономными вычислительными системами, в частности на основе методов подстановочных таблиц.

Алгоритм преобразования на основе СОК

Эллиптические кривые представляют собой особый вид геометрических кривых на плоскости. Они определяются уравнением вида:

$$Y^2 = x^3 + ax + b, \quad (1)$$

где a и b — параметры, характеризующие конкретную кривую [2].

Данные кривые обладают рядом свойств, которые повышают их эффективность, в частности, при построении криптографических алгоритмов:

1. Симметрия относительно оси x : если существует точка $R(x, y)$, существует возможность вычислить координаты обратной точки $-R$ путем умножения ее координаты y на -1 : итоговая точка будет иметь координаты $-R(x, -y)$.
2. Закон сложения точек на эллиптической кривой: если провести прямую линию через любые две точки A и B , лежащие на кривой, при исключении особых кривых ($4a^3 + 27b^2 \neq 0$), то всегда будет существовать пересечение в третьей точке $-C$. Обратная ей точка C принимается равной $C = A + B$.
3. Закон умножения точки на число: касательная к любой точке A на кривой, пересекает кривую еще в ровно одной точке, обозначаемой $-2A$. Соответственно, симметричная $-2A$ точка равна $2A$.

Таким образом, определяются операции инверсии, сложения и умножения на скалярное число. При этом не существует операции, обратной умножению точки эллиптического пространства на скаляр, что делает данный процесс применимым в криптографии для шифрования данных. Для обеспечения возможности выполнения обратного процесса при наличии некоего криптографического ключа можно перенести алгебраические вычисления на эллиптических кривых в структуре конечных полей, также называемых пространством Галуа. В данной алгебраической структуре операции сложения и умножения определяются над конечным набором элементов. Каждый элемент поля является представителем класса эквивалентности по заданной арифметической операции, к примеру, по остатку от деления на число, что позволяет использовать вычисления в системах остаточных классов. Таким образом, формула эллиптической кривой на конечном поле принимает вид:

$$y^2 \bmod p = (x^3 + ax + b) \bmod p,$$

где p — основание, определяющее порядок конечного поля, и, следовательно, кривая принимает вид набора конечных точек — рис. 1.

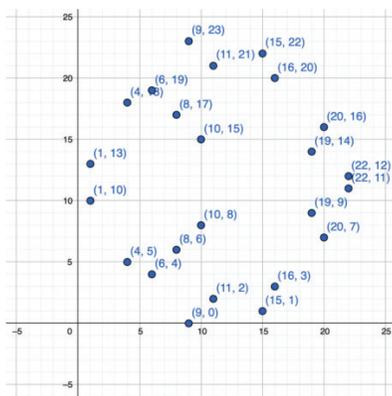


Рис. 1. Представление эллиптической кривой в конечном поле по основанию $p = 23$

Апробация результатов

В качестве вычислительного устройства для практической имплементации алгоритма вычислений эллиптических кривых с использованием принципов системы остаточных классов для уменьшения объема вычислений с помощью подстановочных таблиц был выбран модуль NI PXIe-7962R, оснащенный ПЛИС Xilinx Virtex-5 [3]. Для оценки эффективности алгоритма была разработана его модификация для работы с 32-х битными переменными. Вместо LUT вычисление произведений осуществлялось методом умножения на заранее вычисленные значения отсчетов (1). Показана эффективность предложенного вычислительного алгоритма с возможностью выполнения операций умножения — деления за один такт.

Заключение

Проведен анализ алгоритмов быстродействующих операций умножения—деления для ортогональных преобразований, которые практически могут быть оптимизированы с применением вычислений в пространстве Галуа и системы остаточных классов. В качестве объекта исследований и оптимизации был выбран алгоритм шифрования на основе эллиптических кривых, так как составление LUT для него в целях использования СОК элементарно алгоритмируется и не требует длительной перепроверки как при смене основания СОК, так и смене длины ряда. В ходе апробации было выявлено, что операции умножения-деления в пространствах Галуа $GF(2^m)$ действительно выполнялись одновременно и время выполнения данных операций равнялось одному такту работы устройства. Представляет интерес имплементация результатов исследований на технологии потоковых вычислений модулей FFT для энергоэффективных графических процессоров и модулей.

Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2024-0003.

Литература

1. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 448 с.
2. Коблиц Н. Курс теории чисел и криптографии: Перевод с англ. М. А. Михайловой и В. Е. Тараканова / Под ред. А. М. Зубкова. — Москва: Научное издательство ТВП, 2001. — 260 с.
3. Шеремет Н. В., Турбин Д. С., Амбуркин К. М. Аппаратно-программный стенд контроля вероятности битовых ошибок СВЧ радиоприемных устройств с цифровыми выходами // НИЯУ МИФИ, АО «ЭНПО СПЭЛС», Стойкость-2022.

УДК 621.3.049

Проектирование слоев перераспределения для создания интерпозеров для высокопроизводительных систем

Лебедев Д. Д.¹, к. т. н. Коршунов А. В.², Гладышев А. С.¹, к. ф.-м. н. Лачинов А. А.¹

¹ ООО «Совместное предприятие «Квантовые технологии»

121205, г. Москва, инновационный центр Сколково, ул. Нобеля, 1
aalachinov@rosatom.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработана методика проектирования и расчета параметров слоев перераспределения для производства интерпозеров для сборки высокопроизводительных систем. Приведены варианты применения методики для производства на литографическом оборудовании, обеспечивающем топологические нормы 55 нм на кремниевых пластинах диаметром 300 мм.

Ключевые слова: интерпозер; слои перераспределения; redistribution layer; RDL; сборка; корпусирование на уровне пластины; Fan-Out Wafer level packaging; FOWLP.

На сегодняшний день одной из самых перспективных технологий сборки высокопроизводительных систем является так называемое корпусирование на уровне пластины (wafer level packaging) [1]. Это обусловлено как постоянным усложнением и, соответственно удорожанием, традиционной кремниевой технологией, так перспективами развития новых технологий, в первую очередь на основе квантовых и мемристорных эффектов. В основе него лежит использование слоев перераспределения для передачи сигнала между установленными кристаллами и от кристаллов на печатную плату. Данные слои перераспределения реализуются в виде отдельного кристалла — интерпозера.

Такой подход обладает следующими преимуществами [2]:

- возможность интеграции нескольких кристаллов на одной подложке, в том числе разного типа и изготовленных по разным топологическим нормам;
- уменьшение занимаемой площади на плате и массогабаритных характеристик микросхемы;
- уменьшение длины межсоединений;
- снижение энергопотребления и термического сопротивления.

Итоговые параметры и эксплуатационные характеристики конечного устройства, собранного по данной технологии обуславливаются тремя основным факторами: требования к конечному устройству, электрофизическое взаимодействие используемых материалов, характеристики производственного оборудования,

Соответственно, основной задачей при проектировании слоев перераспределения является разработка такого дизайна слоев, которые обеспечивают наилучшее соответствие требованиям к конечному устройству при минимизации вероятности возникновения электрофизических артефактов в интерпозере.

В работе было проведено исследование и разработка топологии интерпозера для повышения эффективности 2.5D интеграции с учетом массогабаритных

параметров и требований по быстродействию и надежности. В частности, были решены следующие задачи:

1. Моделирование и анализ межсоединений для подбора оптимальных размеров слоев перераспределения RDL;
2. Исследование характеристик межсоединений в слоях перераспределения в зависимости от правил проектирования;
3. Исследование влияния различных материалов интерпозера на основные характеристики слоев перераспределения RDL;
4. Проектирование топологии экспериментального образца.

Литература

1. Garrou P., Koyanagi M. and Ramm P. Handbook of 3D Integration; 3D Process Technology. Vol. 3. William Andrew Publishing, 2014.
2. Lee K. The Next Generation Package Technology for Higher Performance and Smaller Systems // Conference on 3D Architecture for Semiconductors and Packaging. (Burlingame, CA, 31 October — 2 November, 2004). Burlingame, 2006. P. 136–155.

УДК 004.05

Требования к бортовой платформе ОТА транспортного средства как к ключевому элементу технологии V2X

Храмов С. О., Жариков А. М., Клоков В. А.*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
sokhratov@mephi.ru*

Рассмотрена бортовая система беспроводной передачи данных ОТА как ключевой элемент технологии V2X и сформулированы требования, предъявляемые к бортовой платформе ОТА для обеспечения надежности и безопасности транспортных средств.

Ключевые слова: интернет транспортных средств; IoV; ОТА; технология V2X; встраиваемые системы; транспортные средства; автомобильная электроника; беспроводные технологии.

Введение

Технология V2X (Vehicle to Everything) активно развивается во всем мире, в том числе и в Российской Федерации. Ключевой элемент данной технологии — это беспроводная приемо-передающая платформа ОТА (Over the Air), которая позволяет как обновлять программное обеспечение транспортного средства, так и взаимодействовать с данными, поступающими от других участников дорожного движения, поддерживающих технологию V2X и внутренних датчиков транспортного средства. От данной платформы зависит работоспособность всего транспортного средства, а также безопасность его использования. Для обеспечения стабильной работы платформы ОТА были сформулированы требования, гарантирующие безопасную и надежную работу платформы ОТА на протяжении всего ее срока службы.

Технология V2X, IoV и приемо-передающая платформа ОТА

Концепция технологии V2X заключается в том, что транспортное средство на постоянной основе обменивается актуальной информацией с окружающими его участниками дорожного движения: другими транспортными средствами и дорожной инфраструктурой. Анализ полученных данных позволяет формировать наиболее оптимальный и безопасный маршрут передвижения. Помимо межавтомобильной сети и автомобильного беспроводного интернета технология V2X включает в себя и внутриавтомобильную сеть, которая собирает информацию с различных датчиков, установленных в транспортном средстве, анализирует ее и передает другим участникам [1]. Совокупность участников движения и их взаимодействия формируют интернет транспортных средств (Internet of Vehicles, IoV).

Технология V2X может быть реализована в транспортном средстве только при наличии приемо-передающего устройства, обеспечивающего постоянный обмен данными. Для этих целей может быть использована платформа ОТА. В привычном понимании, платформа ОТА предназначена для загрузки «по воздуху» и установки программного обеспечения. Однако использование платформы ОТА исключительно для обновления файлов ПО является неоптимальным решением, так как взаимодействие с обновлениями происходит редко относительно взаимодействия с данными о состоянии окружающей обстановки. Применение платформы ОТА



для передачи этих данных позволяет оптимизировать ресурсы, что крайне важно при разработке встраиваемых систем. Таким образом, платформа ОТА является ключевым элементом технологии V2X и обеспечивает взаимодействие транспортного средства с остальными участниками интернета транспортных средств.

Требования к платформе ОТА

Платформа ОТА, как было описано ранее, является ключевым элементом технологии V2X и интернета транспортных средств. По данной причине, на платформу ОТА должны быть наложены жесткие требования для обеспечения высокого уровня надежности и безопасности [2].

Требования безопасности разделяются на две подгруппы: информационная безопасность и функциональная безопасность. Требования информационной безопасности включают в себя как защиту передаваемых по воздуху данных, так и защиту платформы ОТА от несанкционированного доступа [3]. Требования функциональной безопасности накладывают ограничения на функционал платформы ОТА, такой как взаимодействие с данными: сбор информации с датчиков транспортного средства, прием и передача пакетов с данными, а также их анализ; и обновление ПО: проверка целостности скачанных файлов обновлений, их установка, повторная установка стабильной версии при неуспешном обновлении.

Требования надежности, в наибольшей степени, относятся к программно-аппаратному обеспечению платформы ОТА. К таким требованиям относятся, например, обеспечение отказоустойчивости платформы, временные ограничения на отклик системы при получении новых данных, оптимизация функционирования под текущие условия эксплуатации транспортного средства.

Заключение

Изложенные выше требования к бортовой платформе ОТА обеспечивают высокий уровень безопасности и надежности во время всего срока службы транспортных средств, поддерживающих технологию V2X, тем самым позволяя развивать ее и интегрировать транспортные средства и дорожную инфраструктуру в интернет транспортных средств.

Литература

1. Anand P., Naveen C., Alfred D., Seungmin R. Intelligent Vehicular Networks and Communications. Elsevier, 2017. 227 p. ISBN 978-0-12-809266-8.
2. Haibo Z., Wenchao X., Jiacheng C., Wei W. Evolutionary V2X Technologies Toward the Internet of Vehicles: Challenges and Opportunities // Proceedings of the IEEE, 2020. Vol. 108. № 2. P. 308–323. ISSN 1558-2256.
3. Жариков А. М., Клоков В. А. Принципы организации информационной безопасности встраиваемых систем // Российский форум микроэлектроника 2023: Сборник тезисов 9-й Научной конференции, Москва, 09–14 октября 2023 года. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. — 970 с. — С. 187–188.

УДК 004.2

Проектирование программно-аппаратных комплексов с применением ускорителей на базе GPU и ПЛИС

Тарасов И. Е., д. т. н.*МИРЭА — Российский технологический университет**119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78**tarasov_i@mirea.ru*

Рассмотрен подход к проектированию специализированных программно-аппаратных комплексов, основанный на применении вычислительной платформы, сочетающей использование центрального процессора, графического ускорителя, и ускорителя, реализуемого на базе программируемой логической интегральной схемы.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс; аппаратный ускоритель; архитектура; проектирование.

В настоящее время перспективным направлением повышения эффективности вычислительных систем является их специализация, выполняемая за счет применения соответствующих вычислительных платформ, дополняющих центральный процессор общего назначения (CPU). Распространенным подходом к увеличению производительности вычислений является применение графических процессоров (GPU) в режиме вычислений общего назначения (GPGPU), однако архитектура таких устройств в ряде случаев ограничивает возможности масштабирования производительности. Это связано как с функциональными особенностями GPU в части организации параллельных вычислений, так и особенностями доступа к памяти. Поэтому программно-аппаратные комплексы, содержащие CPU и GPU, могут быть дополнены специализированными ускорителями вычислений на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), назначением которых в составе комплекса является реализация вычислительных устройств, дополняющих возможности исходной платформы.

Рассмотренный подход к проектированию предлагает следующие этапы:

- декомпозиция вычислительной задачи на основе исследования характеристик реализуемых алгоритмов в части функциональных требований, доступа к памяти и возможности параллельного исполнения;
- выделение набора задач, неэффективно реализуемых на базе GPU;
- выбор архитектурного решения для аппаратного ускорителя на базе ПЛИС;
- совместная оптимизация аппаратного ускорителя и специализированного программного обеспечения, выполняемая в дискретном пространстве параметров.

Примером применения подхода является программно-аппаратный комплекс для анализа регулярных выражений в сетевом трафике на базе CPU Эльбрус. Большое количество выражений, подлежащих идентификации, в сочетании с различными алгоритмами анализа, ограничивают возможности применения GPU для решения этой задачи. Выбор в качестве архитектурного подхода набора программируемых конечных автоматов позволяет реализовать анализ основных типов выражений, при этом реализация ряда таких автоматов невозможна на базе GPU.

Добавление к комплексу аппаратного ускорителя на базе ПЛИС позволяет реализовать конечные автоматы с расширенными возможностями анализа регулярных выражений.

Литература

1. Тарасов И. Е., Советов П. Н., Люлява Д. В., Мирзоян Д. И. Методика проектирования специализированных вычислительных систем на основе совместной оптимизации аппаратного и программного обеспечения // Russian Technological Journal, 2024. — № 12 (3). — С. 37–45. — URL: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45>. EDN: P XKDKR.

УДК 004.318

Накристалльная сеть процессоров «Эльбрус» седьмого поколения

Недбайло Ю. А.^{1,2}¹ *АО «МЦСТ»**117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108*² *ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»**119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24*

Описано устройство накристалльной сети процессоров «Эльбрус» седьмого поколения и доработки ее коммутаторов в целях увеличения количества соединяемых устройств и виртуальных каналов, а также улучшения качества обслуживания абонентов.

Ключевые слова: многоядерность; накристалльная сеть; виртуальные каналы; качество обслуживания.

Накристалльная сеть является одним из ключевых компонентов современного многоядерного процессора с распределенным общим кешем. Она осуществляет обмен пакетами различных типов между ядрами, банками общего кеша, контроллерами оперативной памяти и периферийных устройств. Особого внимания при ее проектировании требуют время передачи пакетов, пропускная способность и адекватное ее распределение между абонентами, а также гарантия невозможности дедлоков.

В процессорах «Эльбрус» шестого поколения накристалльная сеть соединяет до 16 ядер и 16 банков кеша. В седьмом поколении их максимальное число предполагается еще увеличить, для чего сеть была надлена поддержкой до 48 ядер и 48 банков. Также была задача расширить поддержку периферийных устройств и многопроцессорности.

Требование поддержки такого количества абонентов в сочетании с необходимостью минимизировать время передачи пакетов обусловило выбор топологии 2D mesh размером до 8×6; все периферийные устройства при этом подключаются к краям сети.

Для поддержки работы периферийных устройств по протоколу Compute Express Link (CXL) и предотвращения дедлоков потребовалось примерно вдвое увеличить поддерживаемое сетью число виртуальных каналов. Чтобы это не повлекло пропорциональное увеличение количества оборудования, устройство буферов и кредитное управление были специально оптимизированы. В результате, для каждого дополнительного виртуального канала, вместо дублирования почти всего оборудования сетевого коммутатора достаточно резервировать в каждом буфере место для одного пакета. Очереди пакетов при этом имитируются специальными арбитрами [1].

Качество обслуживания (QoS) абонентов сетью обеспечивается двумя средствами. Первым является использование отдельных виртуальных каналов приоритетными запросами и расщепление первичных запросов от ядер на несколько виртуальных каналов в зависимости от номера ядра, применявшееся ранее [2]. Вторым стало использование весовых арбитров, подобных [3], веса для которых обновляются динамически в каждом узле сети на основе того, пакеты от каких источников проходили через этот узел.

Экспериментальное сравнение нового дизайна сетевых коммутаторов с применяемым в предыдущем поколении показало улучшение качества обслуживания, а пропускная способность, время передачи пакетов и занимаемая сетевыми коммутаторами площадь изменились незначительно несмотря на увеличение числа виртуальных каналов.

Литература

1. Недбайло Ю. А. Оптимизация коммутаторов на кристалльной сети для поддержки большого числа виртуальных каналов // Proceedings of En&T-2023. — МФТИ, 2023.
2. Nedbailo Yu. A., Tokarev D. S., Shpagilev D. I. Designing a QoS-enabled 2 GHz On-Chip Network Router in 16 nm CMOS // 2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Jun 2022.
3. Muliadi L., Wong R., Swarna M., Duncan S. Fast and highly scalable quota-based weighted arbitration, 2014. US8667200B1.

УДК 004.318

Кеш-память третьего уровня процессоров «Эльбрус» седьмого поколенияСурченко А. В.¹, Недбайло Ю. А.^{1,2}¹ АО «МЦСТ»

117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

² ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»

119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24

Описано устройство кеш-памяти третьего уровня процессоров «Эльбрус» седьмого поколения и его доработки в целях увеличения поддерживаемого количества ядер и банков, работы с новыми периферийными устройствами и снижения частоты промахов.

Ключевые слова: многоядерность; подсистема памяти; общий кеш; инклюзивность; аппаратная компрессия данных.

В современных многоядерных процессорах кеш-память последнего уровня играет особую роль, не только снижая время доступа в память и уменьшая поток обращений в нее, но и поддерживая когерентность между кешами ядер и внешними устройствами. Такой кеш обычно делают распределенным, соединяя его банки на кристалльной сети с ядрами и остальными устройствами. Для поддержки когерентности каждый банк может содержать соответствующую порцию распределенного справочника.

В процессорах «Эльбрус» шестого поколения кеш третьего уровня поддерживает до 16 ядер, включает в себя до 16 банков, и реализует неинклюзивную схему с инклюзивным справочником (NCID) [1], более эффективную, чем инклюзивная схема, использовавшаяся ранее. В процессорах седьмого поколения в кеше была реализована поддержка еще большего числа ядер и банков, современных периферийных устройств, а эффективность работы по схеме NCID дополнительно увеличена.

Для поддержки большего количества ядер и работы с периферийными устройствами по стандарту Compute Express Link (CXL) протокол когерентности, реализуемый кешем, был дополнен новыми типами транзакций, состояниями и условиями перехода между ними. При большом числе копий кеш-строки в кешах ядер вектор их владельцев может храниться в загруженном виде. Также поддержан прямой доступ к кешу Direct Cache Access (DCA) и режим Cache-as-RAM, обеспечивающий функционирование процессора без оперативной памяти.

Для поддержки большого и достаточно произвольного количества банков кеша с возможностью отключения неисправных был разработан новый алгоритм интерливинга [2]. В целях уменьшения времени доступа в память банки логически делятся на группы, соответствующие ближайшим каналам памяти. Номер группы определяется несколькими настраиваемыми разрядами физического адреса кеш-строки с опциональным подмешиванием остальных разрядов по программируемым маскам. В каждой группе может быть отключен один банк. Логический номер банка внутри группы определяется делением части разрядов адреса на количество активных банков в этой группе, также с опциональным подмешиванием других разрядов.

Неинклюзивная схема взаимодействия кешей второго и третьего уровней была доработана для приближения ее эффективности к эксклюзивной без чрезмерного увеличения трафика обмена данными. Для этого реализована и усовершенствована схема FLEXclusion, позволяющая кешам адаптивно, с настраиваемыми порогами переключаться между простой неинклюзивной и эксклюзивной схемами работы в зависимости от статистики попаданий и промахов в тестовые наборы кеша третьего уровня, а также загруженности интерфейсов кешей второго уровня [3].

Также для снижения частоты промахов в кеш была реализована аппаратная компрессия данных. Специально для схемы NCID с расширенным массивом тэгов был разработан алгоритм VAI*-HL [4]. За счет сжатия по разным схемам компрессии кеш-строки могут занимать вдвое меньше места в массиве данных, при этом нулевые строки в нем вовсе не хранятся. Благодаря этому при удвоенном объеме тэгов эффективный объем кеша может увеличиваться до двух раз. Разработанная схема имеет невысокую стоимость и практически не увеличивает время доступа в кеш-память.

Литература

1. Zhao L. et al. NCID: a non-inclusive cache, inclusive directory architecture for flexible and efficient cache hierarchies // Proceedings of the 7th ACM international conference on Computing frontiers, 2010. P. 121–130.
2. Недбайло Ю.А., Сурченко А.В., Пиков В.А. Алгоритм интерливинга распределенного общего кэша многоядерного процессора для произвольного количества банков // Вопросы защиты информации, 2023. — № 3 (142). — С. 59–67.
3. Sim J. et al. FLEXclusion: Balancing Cache Capacity and On-chip Bandwidth via Flexible Exclusion // SIGARCH Comput. Archit. News. — New York, NY, USA, 2012. Vol. 40. № 3. P. 321–332.
4. Недбайло Ю.А., Сурченко А.В., Бычков И.Н. Снижение частоты промахов в неинклюзивный кэш с инклюзивным справочником многоядерного процессора // Компьютерные исследования и моделирование, 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 639–656.

УДК 621.382

Перспективы использования микропроцессоров BE-S1000 в серверном оборудовании

Хренов Г. Ю., Кауркин М. Н., Гусев В. В.*АО «Байкал Электроникс»**143421, Московская область, городской округ Красногорск, территория автодорога «Балтия», 26-й километр, 5, стр. 1, 5 этаж*

В работе рассмотрены вычислительные возможности серверного оборудования, построенного на основе отечественных микропроцессоров BE-S1000. Проведен тщательный анализ производительности этих микропроцессоров при их использовании в различных видах серверного оборудования и при решении различных типовых вычислительных задач.

Ключевые слова: микропроцессоры с архитектурой ARMv8; серверные платформы; бенчмарки.

На сегодняшний день наиболее распространенными процессорами, применяемыми в серверном оборудовании, являются процессоры компаний Intel и AMD. Эти процессоры используют хорошо известную, проверенную временем архитектуру x86, которая по факту является «золотым стандартом» для серверного рынка. Одновременно с этим, в последнее годы появился значительный интерес к серверным процессорам на альтернативных архитектурах, прежде всего на архитектуре ARMv8 компании ARM. Ряд крупных зарубежных потребителей серверного оборудования уже разработали на этой архитектуре собственные процессоры и/или серверное оборудование для центров обработки данных. По данным зарубежных источников за последнее три года поставки серверов с процессорами на архитектуре ARM выросли более чем в три раза, что указывает на их высокую конкурентоспособность по отношению к ветеранам серверного парка.

В Российской Федерации в 2021 году также был разработан и выпущен микропроцессор BE-S1000, представляющий собой 48 ядерный микропроцессор с архитектурой ARMv8, 6 каналами памяти DDR4-3200 и 80 линиями PCIe четвертого поколения. Микропроцессор поддерживает построение одно, двух и четырех процессорных серверных платформ, обеспечивая комфортное для изготовителей серверного оборудования максимальное энергопотребление на уровне 120 Ватт для каждого активного микропроцессора. Насколько можно судить по опубликованным в открытой печати данным, этот микропроцессор является наиболее производительным отечественным микропроцессором общего назначения. В настоящей работе проводится глубокий и всесторонний анализ полученных результатов по производительности указанного микропроцессора при его использовании в различных типовых приложениях. В качестве средств измерения производительности микропроцессора были использованы хорошо зарекомендовавшие себя наборы таких бенчмарков как CoreMark, GeekBench, SPEC2006, SPEC2017, HPL, а также ряд других. Анализ результатов показал хорошую масштабируемость архитектурных решений, принятых при разработке микропроцессора, при его работе как в составе серверных платформ общего назначения, так и для решения суперкомпьютерных задач. Полученные результаты позволили провести сравнение отечественного микропроцессора с распространенными микропроцессорами Xeon Gold 6230 и Kunpeng 920, которое показало высокую конкурентоспособность отечественного решения.



УДК 621.384.3; 681.883

Символьная синхронизация при приеме сигналов в гидроакустических информационно-управляющих комплексах

Орлов А. В., Ракин А. В.

АО «НИИ «Субмикрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2

submicron@se.zgrad.ru

Проведен анализ особенностей внутренней синхронизации сложных сигналов в низкоскоростных асинхронных гидроакустических каналах связи. Представлены результаты статистического моделирования. Даны рекомендации по обработке в условиях многолучевого распространения.

Ключевые слова: гидроакустика; многолучевое распространение; синхронизация.

Современные информационно-управляющие комплексы и системы связи используют цифровую обработку сигналов [1]. Обработка сигналов заключается в демодуляции принимаемого сигнала, его декодировании и выделении информационного сообщения. Общая характеристика задачи вхождения в связь, оптимальные цифровые системы, а также частные случаи вхождения по частоте и задержке рассматривались в [2–4]. Одной из проблем является многолучевое распространение сигнала с интерференцией и реверберацией, что приводит к ухудшению качества приема. Для эффективной демодуляции и декодирования необходимо постоянно отслеживать временное положение преамбулы и информационных импульсов. Известные методы оценивания времени задержки в условиях многолучевого распространения работают плохо. Один из путей повышения качества заключается в применении обработки, согласованной с каналом распространения [5], поэтому необходима разработка алгоритмов оценивания времени прихода синхросигнала и импульсной характеристики канала для анализа информационных символов.

Целью данной работы является анализ особенностей внутренней синхронизации сложных сигналов в низкоскоростных асинхронных гидроакустических каналах связи информационно-управляющих комплексов.

Одной из первых задач цифрового приемника гидроакустического сигнала является формирование строб-импульсов, синхронных по частоте с тактовой частотой передачи информационных символов источника информации. Для облегчения ее решения в состав сигнала вводится преамбула, которая служит в качестве реперного знака. Для передачи преамбулы используется сложный сигнал, кодированный отличающимся от ансамбля информационных символов кодом. В результате обработки преамбулы формируются оценки ее временного положения и доплеровского смещения частоты с использованием внутренней шкалы времени. Эти оценки обеспечивают устойчивую и достаточно надежную символьную синхронизацию, а также дают возможность оценить импульсную характеристику канала распространения.

С помощью статистического моделирования проведены исследования данного метода коррекции моментов синхронизации, влияния точности оценивания

временного положения преамбулы на точность определения времени прихода информационных символов. Получены зависимости СКО оценивания частоты от ширины спектра сигнала, от числа используемых доплеровских каналов.

Дана классификация искажений сигналов при различной степени многолучевости. Проведен анализ алгоритмов приема преамбулы в виде сложного сигнала с учетом статистических характеристик канала многолучевого распространения. Показано, что в подобных условиях сигнала в зависимости от степени искажений потери в пороговой мощности сигнала могут составлять до 2 дБ при слабых искажениях, до 3 дБ — при средних и до 4,5–5,5 дБ — при сильных. Анализ результатов моделирования выявил смещенность оценки времени прихода, зависящую от гидрологической обстановки.

Разработаны рекомендации по выбору числа доплеровских каналов при обработке преамбулы, а также методика выбора структуры и параметров устройства оценивания временного положения сложного сигнала в условиях многолучевого распространения.

Литература

1. Маркович И. И. Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах. — Ростов н/Д: издательство Южного федерального университета, 2012. — 236 с.
2. Жодзишский М. И., Мазепа Р. Б., Овсянников Е. П. и др. Цифровые радиоприемные системы: Справочник / Под ред. М. И. Жодзишского. — М.: Радио и связь, 1990. — 208 с.
3. Лосев В. В., Бродская Е. Б., Коржик В. И. Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов / Под ред. В. И. Коржика. — М.: Радио и связь, 1988. — 224 с.
4. Mengali U., D'Andrea A. N. Synchronization Techniques for Digital Receivers. N.Y. Plenum Press, 1997. 530 p.
5. Маркович И. И. Методы и алгоритмы цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов в многолучевых эхолотах и локаторах препятствий // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2014. — Т. 7. — № 2. — С. 58–71.



УДК 629.052.3

Исследование FMCW MIMO-радара с медленной фазокодовой манипуляцией

Мелёшин Ю. М., Хасанов М. С., Карпов В. Н., Лялин К. С.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Показаны разработанная архитектура и эскизный облик FMCW MIMO-радара и промоделированы основные режимы его работы. Проведено сравнение радаров с быстрым (внутриимпульсным) и медленным (между импульсами) изменением фазы в каналах передатчиков. Сделаны выводы о существенном сокращении вычислительной сложности алгоритмов ЦОС в системе с медленной фазовой манипуляцией.

Ключевые слова: FMCW MIMO; фазокодовая манипуляция; ортогональные сигналы; радары.

Одним из базовых принципов построения линейно-частотно-модулированных радаров непрерывного излучения с множественным входом и множественным выходом (FMCW MIMO) является необходимость обеспечения ортогональности между сигналами, излучаемыми с различных передающих антенных каналов. В FMCW MIMO-радаров для этого традиционно используют частотное [1] и фазокодовое разделение с быстрым изменением фазы внутри каждого импульса [2–4], однако оба представленных подхода требуют использования дополнительных аппаратных усложнений в виде смесителей [5], цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) [6] или дополнительно увеличенной частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [7].

В работе рассмотрен подход к проектированию FMCW MIMO-радаров, в котором ортогональность между сигналами с различных передающих антенных элементов достигается за счет изменения начальной фазы каждого ЛЧМ-импульса по двоичному псевдослучайному закону. Такой подход не требует формирования набора частот и использования ЦАП, а требует только возможности управления знаком гармонического сигнала, что эквивалентно изменению фазы на 0/180 градусов.

Показаны разработанная архитектура и эскизный облик FMCW MIMO-радара с медленным изменением фазы и промоделированы основные режимы его работы. Проведено сравнение радаров с быстрым и медленным изменением фазы в каналах передатчиков. Сделаны выводы о существенном сокращении вычислительной сложности алгоритмов ЦОС в системе с медленной фазовой манипуляцией.

Литература

1. Jeon S.-Y. et al. W-band FMCW MIMO radar system for high resolution multimode imaging with time- and frequency-division multiplexing // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020. Vol. 58. № 7. P. 5042–5057.
2. Khasanov M. S., Meleshin Y. M. and Karpov V. N. Investigation into FMCW MIMO Radar Design Based on Fast Phase Coded Waveforms // 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russian Federation, 2024. P. 1–4.

3. Pereverzev A. L., Lyalin K. S., Meleshin Y. M., Karpov V. N., Kolesnikov R. N. Development of a MIMO radar based on FKM signals (in Russian) // *Nanoindustry*, 2022. Vol. 15. № 113. P. 54–58.
4. Sit Y. L., Li G., Manchala S., Afrasiabi H., Sturm C. and Lubbert U. BPSK-based MIMO FMCW automotive-radar concept for 3D position measurement // 2018 15th European Radar Conference (EuRAD), Madrid, Spain, 2018. P. 289–292.
5. Li S., Zhai Y., Yang B. and Wang J. Smoothing Method for Range and Angle Super Resolution Frequency-Division-Multiplexing FMCW MIMO Radar // 2021 IEEE 6th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), Nanjing, China, 2021. P. 590–594.
6. Kumbul U., Petrov N., Vaucher C. S. and Yarovoy A. Smoothed phase-coded FMCW: waveform properties and transceiver architecture // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, April 2023. Vol. 59. № 2. P. 1720–1737.
7. Wu R. H., Garrity D. A., Brett M. Method and system for frequency offset modulation range division MIMO automotive radar: пат. 11662427 США. 2023.



УДК 621.396

Малогобаритная первичная ММО радиолокационная станция ближней зоны действия

Иванов А. В., д. т. н. Сеницын Е. А.

АО «Обуховский завод»

192012, г. Санкт-Петербург, просп. Обуховской Обороны, 120

esinit@yandex.ru

Представлены результаты разработки новой наземной малогабаритной первичной ММО радиолокационной станции (РЛС) для обнаружения, сопровождения и измерения координат малоразмерных воздушных и наземных целей в ближней секторной зоне действия. Приводятся основные характеристики и краткое описание ММО РЛС.

Ключевые слова: РЛС; ЦАФАР; ММО; измерение координат; когерентная обработка; обнаружение; ортогональные зондирующие сигналы; цель.

Одним из направлений современного развития радиолокационных станций (РЛС) является создание РЛС с использованием принципов Multiple Input Multiple Output (ММО) — множественный вход, множественный выход [1].

Антенна предлагаемой наземной малогабаритной первичной ММО РЛС в пределах единой плоской конструкции содержит разнесенные передающую и приемную цифровые активные фазированные антенные решетки (ЦАФАР), излучающие и приемные ВЧ-элементы которых имеют вид набора печатных патч-элементов, обеспечивающих независимое формирование диаграмм направленности (ДН) соответственно для излучения ортогональных зондирующих сигналов (ЗС) и приема отраженных радиолокационных сигналов. Патч-элементы ЦАФАР располагаются в плоскости антенны таким образом, чтобы обеспечить формирование виртуальной приемо-передающей апертуры, расширенной по сравнению с физическими размерами ЦАФАР, что позволяет уменьшить ширину луча приемных ДН, повысить коэффициент усиления ЦАФАР на прием и, соответственно, энергетический потенциал ММО РЛС, улучшить разрешающую способность и уменьшить погрешность измерения угловых координат в ходе обнаружения воздушных и наземных целей, используя малогабаритную антенну и передающие каналы с низким уровнем излучаемой мощности ЗС.

Малогобаритная ЦАФАР ММО РЛС формирует несканирующие ДН с широкими лучами для излучения ЗС и относительно узкими лучами для приема радиолокационных сигналов. Благодаря предложенному техническому решению формированию ортогональных ЗС и обработки радиолокационных сигналов образуется набор узких лучей приемо-передающих ДН, позволяющих получить требуемое разрешение по угловым координатам. Широкая полоса ЗС обеспечивает высокую разрешающую способность ММО РЛС по дальности. Низкий уровень излучаемой мощности ЗС повышает параметры скрытности функционирования ММО РЛС. Цифровая реализация передающих и приемных каналов создает условия для реализации высокой адаптивности ММО РЛС к изменению внешней помехово-целевой радиолокационной обстановки, при этом обеспечивается возможность оперативного управления формой ДН на передачу и прием, текущего управления излучаемой мощностью ЗС, реализации различных режимов работы, в т.ч. одновременное наблюдение всего контролируемого окружающего секторного пространства,

равномерный и квазислучайный последовательные обзоры зоны действия, обзор пространства с пространственной селекцией путем формирования максимумов и нулей ДН в заданных направлениях, поиск и обнаружение целей, сопровождение выбранных целей, пеленгование направлений внешнего излучения и т. п.

МІМО РЛС в режиме поиска и обнаружения целей излучает ЗС и одновременно принимает отраженные радиолокационные сигналы во всем секторе зоны действия без сканирования передающих и приемных ДН. Отсутствие сканирования лучей ДН позволяет значительно повысить энергетический потенциал МІМО РЛС путем увеличения времени наблюдения целей, когерентного накопления и обработки отраженных радиолокационных сигналов [2]. Техническая реализация МІМО РЛС требует внедрения современных технологий построения широкополосных излучающих и приемных ВЧ-элементов на базе полосковой техники, использования перспективных высокопроизводительных аппаратно-программных средств, например интегральных схем (ИС) программно определяемых радиосистем Software Defined Radio (SDR) типа ИС SDR AD9361, для формирования набора ортогональных ЗС и многоканальной цифровой обработки принимаемых радиолокационных сигналов, а также каналов обмена информацией с высокой пропускной способностью.

В состав предлагаемой МІМО РЛС входит распределенный передатчик с двумя излучателями, распределенный приемник с восемью приемными антенными патч-элементами, высокостабильный опорный генератор, синхронизатор, устройство управления и сигнальный процессор. Сформированные ортогональные ЗС через соответствующие излучатели передаются в пространство и формируют широкие ДН на передачу. Благодаря пространственно-временному ортогональному кодированию сигналы на приемной стороне могут быть различимы. Отражаясь от цели, сигналы передающих каналов поступают на обработку в каждый приемный канал. В результате специального расположения передающих излучателей, приемных элементов антенны и быстродействующего сигнального процессора появляется возможность синтеза виртуальной апертуры ЦАФАР, размеры которой больше по сравнению с физическими размерами передающей и приемной антенн. Благодаря двум передающим и восьми приемным каналам с помощью специальной математической обработки реализуется виртуальная расширенная апертура приемной антенны из 8×2 элементов, что позволяет увеличить разрешающую способность по угловым координатам и улучшить прочие характеристики РЛС без расширения физических размеров АФАР, тем самым повышая мобильность МІМО РЛС.

Представленные технические решения по созданию МІМО РЛС рекомендуются использовать для разработки переносных малогабаритных МІМО РЛС ближней секторной зоны действия, обеспечивающих решение задач по охране объектов, управлению полетами и посадкой БПЛА, пеленгованию направлений излучения внешних источников радиоизлучений, обнаружению и противодействию БПЛА в ближней зоне воздушного пространства и т. п.

Литература

1. Черняк В.С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе МІМО РЛС // Успехи современной радиоэлектроники, 2012. — № 8. — С. 29–46.
2. Jian Li. MIMO Radar Signal Processing. Wiley—IEEE Press, 2009. Радиолокационная система МІМО. URL: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp25.ru.html>.



УДК 621.396

Моделирование влияния нелинейно-инерционных искажений в тракте основной частоты цифровых систем связи на целостность сигналов

Семенов Э. В.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
edwardsemyonov@narod.ru*

Показано, что использование моделей устройств в виде нелинейных рекурсивных фильтров позволяет анализировать целостность сигналов в тракте основной частоты цифровых систем связи. Это позволяет учесть искажения цифровых сигналов в ЦАП и АЦП, широкополосных усилителях, активных фильтрах.

Ключевые слова: нелинейно-инерционные искажения; основная полоса частот; целостность сигналов.

В радиочастотной части систем связи устройства моделируются при помощи модели полигармонических искажений (X -параметров). Однако для тракта основной частоты такие модели непригодны. В последние годы созданы подходящие для инженерной практики нелинейно-инерционные модели узлов для основной полосы частот [1] и аппаратура для измерения их характеристик [2].

Такие модели протестированы на одиночных ступенчатых и импульсных сигналах [1]. Однако этого недостаточно для оценки их работы на сложных близких к реальным сигналах. В настоящем докладе рассматривается применение модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра третьего порядка для анализа целостности сигнала QAM64 в АЦП приемника цифровой системы связи.

В качестве примера использован АЦП National Semiconductor ADC08060 (125 МГц / 8 бит) с буферным усилителем SST5912-LF, частотно-компенсированным аттенуатором на 14 дБ и операционным усилителем LMN6714. Для данного АЦП синтезирована модель в виде нелинейного рекурсивного фильтра третьего порядка с вложенными обратными связями и интеграторами в них [1]. Статические нелинейные искажения в данном АЦП не превышают 0,2% (это максимум того, что могут отразить в области основных частот модели в современных САПР), в то время как динамическая нелинейность достигает 7%.

На рис. 1 приведены модели глазковых диаграмм на выходе АЦП для одного из квадратурных каналов модуляции QAM64. Тестовая последовательность содержит три символа, межсимвольная интерференция в АЦП подавлена трансверсальным корректором. На рис. 1а изображена глазковая диаграмма при оцифровке в режиме малого сигнала, на рис. 1б — в диапазоне, близком к предельному для данного АЦП.

Из рис. 1б можно видеть, что модель описывает не только линейные переходные процессы в АЦП, но и изменение динамических свойств АЦП с изменением входного сигнала. Кривые на глазковой диаграмме систематически проходят выше точного значения (горизонтальная штриховая линия), при этом усиливается межсимвольная интерференция (разные кривые проходят на разных уровнях в момент стробирования (вертикальная штриховая линия)).

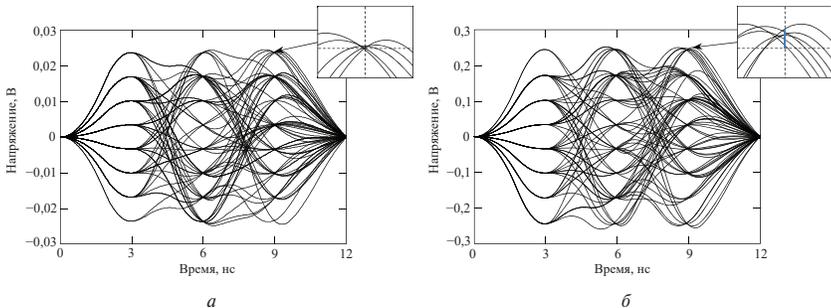


Рис. 1. Глазковые диаграммы на выходе модели АЦП для одного из квадратурных каналов модуляции QAM64 для малосигнального (а) и большесигнального (б) режима оцифровки

Перечисленные эффекты объясняются нелинейными искажениями, поскольку на рис. 1а (малый сигнал) они практически незаметны. Поэтому дополнительно возникающая межсимвольная интерференция не может быть подавлена линейным трансверсальным корректором. Также видно, что использованная нелинейно-инерционная модель предсказывает эффект накопления искажений со временем — на третьем импульсе нелинейных искажений больше, чем на первом.

В большесигнальном режиме отклонение значений напряжения на глазковой диаграмме в моменты стробирования от точных значений достигает 4,7%. Для рассмотренного примера модуляции это не является фатальным. Однако для более сложных видов модуляции (например неортогональных с разделением абонентов по мощности (PD-NOMA [3])) такой уровень межсимвольной интерференции может привести к неприемлемому увеличению количества битовых ошибок. Подчеркнем, что в инженерной практике в настоящее время нет альтернативных подходов, которые позволяют выполнить анализ, подобный вышеизложенному.

Литература

1. Semyonov E. V. Synthesis of behavioral models for circuits with nonlinearity less than model error // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023. Vol. 70. № 6. P. 2216–2220.
2. Назаров М. А., Семенов Э. В. Характериограф нелинейных элементов и устройств, работающих в видеоимпульсном режиме // ЭКБ и микроэлектронные модули. Форум «Микроэлектроника-2023»: сборник тезисов научной конференции. — Сочи, 9–14 октября 2023. — С. 156–157.
3. Крюков Я. В., Покаместов Д. А., Рогожников Е. В. Сравнение теоретической и реальной пропускной способности PD-NOMA // Радиотехника и электроника, 2023. — Т. 68. — № 1. — С. 95–102.

УДК 621.373.12

Генератор СВЧ-сигналов на основе элементов радиوفотоники

Погорельский И. В., Цветков В. К., к. т. н.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

valerbelev@gmail.com

В статье рассматривается разработка и испытания макета генератора сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов на основе сочетания элементов СВЧ-электроники и радиوفотоники. Описываются принципы работы, конструкция и результаты испытаний генератора, а также обсуждаются перспективы его применения в различных областях радиоэлектроники.

Ключевые слова: генератор СВЧ; радиوفотоника.

В современных радиотехнических системах, основанных на использовании синтезаторов частот, существует проблема высокого уровня спектральной плотности мощности фазовых шумов при генерации СВЧ-сигналов на частотах диапазонов Ка и выше. Это значительно ограничивает потенциал развития радиотехнических систем.

В данной статье предлагается новый подход к разработке генераторов СВЧ-сигналов, основанный на использовании элементов радиوفотоники. Это техническое решение позволит не только снизить уровень фазовых шумов выходного СВЧ-сигнала, но и использовать ряд других преимуществ, которые появляются при передаче СВЧ-сигналов по волоконно-оптическим линиям [1]. Данный принцип позволяет создать более простые эффективные генераторы, которые могут найти широкое применение в радиолокации [2], при построении систем связи пятого и шестого поколений [3].

Результаты испытаний макета генератора на дискретных элементах, собранного по схеме с оптикоэлектрической цепью обратной связи [4] и по схеме суммирования [5], показали, что он способен генерировать СВЧ-сигналы с требуемыми характеристиками по спектральной плотности мощности фазового шума и по точности установки частоты.

Дальнейшее развитие генераторов на основе элементов радиوفотоники предполагает миниатюризацию и интегральное исполнение, которые позволят перейти от исполнения в виде системы из дискретных компонентов. Компактное исполнение генератора, формирующего выходной сигнал с улучшенными характеристиками спектральной плотности мощности фазового шума, позволит реализовать принципиально новый подход к радиоэлектронной аппаратуре.

Генератор может быть использован в различных радиоэлектронных системах, таких как радары с повышенной разрешающей способностью, позволяющей обнаруживать малозаметные цели; разнесенные радары, в том числе построенные по принципу МИМО; системы связи, сочетающие в себе беспроводную передачу данных с передачей по волоконно-оптическим линиям.

Литература

1. Xu K., Wang R., Dai Y., Yin F., Li J., Ji Y., Lin J. Microwave photonics: radio-over-fiber links, systems, and applications // Photon, 2014. Vol. 2. № 4. P. B54-B63. URL: <https://org.optica.org/prj/abstract.cfm?uri=prj-2-4-b54> (дата обращения: 11.03.2024).

2. Shilong Pan, Yamei Zhang. Microwave Photonic Radars // *Journal of Lightwave Technology*, 2020. Vol. 38. № 19. P. 5450–5484. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9089228> (дата обращения: 11.03.2024).
3. Fang Zou, Lei Zou, Bo Yang et al. Optoelectronic oscillator for 5G wireless networks and beyond // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021. Vol. 54. № 42. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/ac13f2 (дата обращения: 11.03.2024).
4. Yao X. S., Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator // *Journal of the Optical Society of America B*, 1996. Vol. 13. P. 1725–1735. URL: <https://opg.optica.org/josab/abstract.cfm?URI=josab-13-8-1725> (дата обращения: 11.03.2024).
5. Zhang W., Yao J. Silicon Photonic Integrated Optoelectronic Oscillator for Frequency-Tunable Microwave Generation // *Journal of Lightwave Technology*, 2018. Vol. 36. № 19. P. 4655–4663. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8345585> (дата обращения: 11.03.2024).



УДК 621.375

Формулировка технических требований и выбор конструктивных решений для модуля индуктивного питания имплантируемого нейростимулятора

Данилов А. А.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
arseny.danilov@gmail.com

Сформулированы основные технические требования и описаны основные конструктивные решения для модуля индуктивного питания имплантируемого нейростимулятора.

Ключевые слова: методы проектирования; беспроводная передача энергии; индуктивная связь; нейростимулятор.

Одним из основных способов энергообеспечения имплантируемых нейростимуляторов является использование индуктивных систем питания для периодической подзарядки аккумулятора, интегрированного в корпус нейростимулятора. Достоинствами этого метода являются существенное (до 30%) уменьшение габаритов имплантируемого устройства, обеспечение большей свободы выбора режимов стимуляции для пациента, увеличение продолжительности службы нейростимулятора и, соответственно, уменьшение расходов на лечение и снижение риска развития послеоперационных осложнений за счет сокращения числа необходимых хирургических вмешательств. Основными проблемами использования индуктивных систем питания для нейростимуляторов являются необходимость регулярной (раз в несколько дней) процедуры зарядки; риск неудачной или неполной зарядки аккумулятора (из-за смещений передающей и принимающей катушек индуктивности относительно друг друга); тепловой дискомфорт и угроза тепловой травмы во время процедуры зарядки.

Технические требования к модулю индуктивного питания нейростимулятора формулируются с учетом устоявшихся практик применения и возможности решения основных проблем применения. К первым можно отнести следующие основные требования: расстояние передачи энергии в номинальной позиции — 10 мм; выходная мощность в диапазоне 0,1–0,5 Вт; рабочая частота в диапазоне 80–400 кГц; габаритные размеры принимающей катушки — не более 50 мм. Вторые можно сформулировать следующим образом: перепад выходной мощности не более $\pm 10\%$ при боковых смещениях катушек индуктивности до 20 мм; нагрев окружающих тканей до температуры не выше 42 °С.

Основные конструктивные решения, обеспечивающие соответствие техническим требованиям, могут быть сформулированы следующим образом. Катушки индуктивности — плоские концентрические кольцевые с разреженной намоткой (расстояние между витками больше поперечного сечения). Габариты принимающей катушки — максимально допустимые, диаметр 50 мм. Габариты передающей катушки в диапазоне 1–2 габаритов принимающей катушки. Передающая часть системы — генератор синусоидального сигнала на основе усилителя мощности класса E с возможностью управления емкостью шунтирующего и последовательного конденсаторов в нагрузочной цепи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024).

УДК 004.896

Требования к электронной компонентной базе системы управления робототехническими комплексами

Д. т. н., профессор Мещеряков Р. В.

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65

trv@ipu.ru

Широкое применение робототехнических систем и комплексов требует совершенствования систем управления в части повышения быстродействия, точности вычислений, а также повышения автономности и интеллектуальности принимаемых решений. Одним из узких мест является используемая электронная компонентная база в части бортового вычислителя и сенсорной базы. Предлагаемая классификация требований позволит сформировать согласование электронной компонентной базы робототехнического комплекса для реализации в проектах. Перспективные направления включают не только одиночное управление РТК, но и возможность формирования сложных гетерогенных групп.

Ключевые слова: электроника; робототехника; управление; электронная компонентная база; электронная компонентная база.

Потребности экономики в средствах автоматизации и роботизации растут экспоненциально. В то же время развитие робототехнических систем и комплексов сейчас идет в направлении повышения автономности и интеллектуализации. Сложность системы управления определяется сложностью принимаемых решений и выполняемых функций. Как правило, в систему управления закладываются модели объекта управления, модели внешней среды и базовые модели управления в зависимости от уровня автоматизации и интеллектуализации.

Архитектура системы управления робототехнической системы управления включает базовое вычислительное ядро, которое имеет обработчики первичной информации, обеспечивающие выполнение основных вычислений и выдачу управляющих команд на исполнительные механизмы. Вместе с тем существующие подходы к построению вычислительного ядра, как правило, используют централизацию всех вычислительных ресурсов. С другой стороны, для нормального функционирования требуется хорошее сенсорное обеспечение. Как правило, большинство робототехнических комплексов имеет в своем составе датчики положения, датчики состояния, а также навигационную систему.

Требования можно будет распределить по нескольким категориям. Первичные физические требования заключаются в необходимости, чтобы массогабаритные показатели были допустимы для робототехнического комплекса. Следующее обязательное требование — это электромагнитная совместимость, т. е. соответствие напряжений и требуемого тока нагрузке, а также возможность использования таймера для синхронизации и наличие портов для подключения. Следующим уровнем согласования являются протоколы нижнего уровня для передачи базовых сигналов и получения первичной сигнальной информации с сенсоров, а также выдачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы.



Возможности реализации вычислительной архитектуры предъявляют требования по наличию ресурсов: количество ядер, объемы и быстродействие ПЗУ, ОЗУ, кеша, наличие режимов прямого доступа к памяти и др. Реализация микросервисной архитектуры на базе микрокомпьютера позволяет работать в режиме прямого параллелизма или его моделирования. Могут быть реализованы программные сервисы с использованием операционных систем типа Linux и ROS (2) для организации программного взаимодействия.

№	Показатель	Требование
1	Массогабаритные показатели	Соответствие массогабаритным показателям и возможностям РТК
2	Электромагнитная совместимость	Напряжение питания, мощность
3	Сенсорное обеспечение	Первичные датчики, необходимые для работы РТК
4	Порты	Достаточность для подключения и работы
5	Протоколы	Соответствие получаемой и передаваемой информации
6	Вычислительные ресурсы	Микропроцессор, ПЗУ, ОЗУ
7	Операционная система	Возможность обработки данных
8	Коммуникационная подсистема	Скорость передачи данных, протоколы, помехоустойчивость, физические принципы
9	Обеспечение энергией	Мощность, вольтаж
10	Алгоритмы искусственного интеллекта	Возможность реализации моделей, алгоритмов и программных средств, которые реализуют технологию искусственного интеллекта

В докладе рассмотрена апробация требований на базе проекта по реализации полетного контроллера на российской элементной базе. Формализация требований позволила обеспечить создание системы управления с учетом возможностей микроконтроллера и соответствующей обвязки. Перспективным направлением работы является реализация гетерогенной группы РТК [1]. Это позволит перераспределять задачи и использовать ЭКБ в полной загрузке.

Литература

1. Кутахов В. П., Мещеряков Р. В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // Проблемы управления, 2022. — № 1. — С. 67–74.

УДК 621.3.051.025

Технология беспроводного питания множества устройств в масштабах помещения

Джандалиева А., Михайлов Н., Вдовенко А., Сиганов М., Майоров Е., к. т. н.
Серегин П., к. ф.-м. н. Щелокова А., д. ф.-м. н. Белов П. А.
Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А

В данном исследовании предлагается подход к созданию резонатора масштаба комнаты, предназначенного для беспроводной зарядки устройств. Основной его особенностью является однородность распределения амплитуды радиочастотного магнитного поля, равная 91%. Такая конструкция гарантирует равномерную эффективность передачи энергии электронным устройствам в любой точке внутреннего пространства.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; однородность магнитного поля; объемный резонатор; эффективность передачи энергии.

Научно-технический прогресс характеризуется развитием разнообразных электронных устройств, способствуя повышению комфорта жизни человека и помогая быстрее и эффективнее решать различные задачи. Однако широкое распространение мобильных устройств, как носимых (телефоны, планшеты, ноутбуки), так и стационарных (освещение, вентиляция), создает проблему ограниченного радиуса действия, обусловленного зависимостью от длины проводов и расположения розеток внутри помещения. Кроме того, любое изменение схемы расположения электронных приборов, например, в офисном или производственном помещении под изменившуюся концепцию его применения вызывает большие затруднения.

Технология беспроводной передачи энергии (БПЭ) представляет собой перспективное решение проблемы ограниченного радиуса действия электронных устройств, вызванной зависимостью от длины кабелей и расположения розеток. В отличие от традиционного метода, где устройство располагается непосредственно на зарядной площадке, предлагается организовать передачу энергии во всем объеме помещения. Это позволит свободно размещать как носимые, так и стационарные устройства, устраняя ограничения на количество устройств в области зарядки.

Анализ научной литературы указывает на растущий интерес к разработке альтернативных решений для беспроводной передачи энергии (БПЭ), что свидетельствует о необходимости создания конкурентоспособного продукта на российском и мировом рынке. Например, в нескольких работах описан многомодовый квазистатический объемный резонатор, который может работать на двух модах [1, 2]. Данная конструкция имеет неравномерное распределение амплитуды магнитного поля во внутреннем объеме и работает на частотах, не соответствующих общепринятым стандартам технологии БПЭ.

Концепция данного исследования заключается в разработке объемного резонатора с однородным распределением амплитуды магнитного поля, позволяющего передавать энергию в приемник беспроводным способом с одинаковой эффективностью в любой точке внутреннего пространства. Геометрия конструкции была вдохновлена «метасолоноидом» — массивом разомкнутых кольцевых резонаторов,



который ранее использовался для улучшения качества сканирования в магнитно-резонансной томографии [3, 4, 5]. Объемный резонатор должен обладать низкими тепловыми потерями при своей работе, конфигурация создаваемого им поля должна хорошо сочетаться с соответствующей конфигурацией магнитного поля приемных антенн (катушек) носимых устройств и полем источника (при бесконтактном варианте питания резонатора). Помимо низких тепловых потерь резонатор должен характеризоваться минимальными потерями на излучение в своей структуре. По сравнению с известными прототипами зарубежных конкурентов [1, 2], данная версия резонансной структуры ориентирована на возможность скрытого встраивания, например, в какие-то небольшие мебельные модули или в жилые помещения стандартных форм. В последнем случае речь идет об интеграции металлической структуры резонатора в стены помещения на этапе первичного строительства, капитального или даже косметического ремонта. Таким образом, объемный резонатор для беспроводной зарядки в перспективе позволит вывести на новый уровень концепцию умного дома, реализует возможность множественного доступа людей к зарядовой инфраструктуре для их электронных гаджетов без потери мобильности, а также откроет легкий путь к обустройству интерьеров помещений маломощными электрическими устройствами. Образ предлагаемого в проекте технического решения представлен на рис. 1.



Рис. 1. Образ предлагаемого технического решения — беспроводной зарядки электроники в пространстве: желтыми линиями схематично представлена геометрия разрабатываемого резонансного устройства

Литература

1. Sasatani T., Sample A. P., Kawahara Y. Room-scale magnetoquasistatic wireless power transfer using a cavity-based multimode resonator // *Nature Electronics*, 2021. Vol. 4. № 9. P. 689–697.
2. Sasatani T. et al. Multimode quasistatic cavity resonators for wireless power transfer // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017. Vol. 16. P. 2746–2749.

3. Shchelokova A. V. et al. Volumetric wireless coil based on periodically coupled split-loop resonators for clinical wrist imaging // *Magnetic resonance in medicine*, 2018. Vol. 80. № 4. P. 1726–1737.
4. Puchnin V. et al. Metamaterial inspired wireless coil for clinical breast imaging // *Journal of Magnetic Resonance*, 2021. Vol. 322. P. 106877.
5. Jandaliyeva A. et al. Control of the near magnetic field pattern uniformity inside metamaterial-inspired volumetric resonators // *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2022. Vol. 48. P. 100989.



УДК 621.391.7

Развитие аппаратного ускорения отечественных постквантовых алгоритмов для малоресурсных устройств и систем общего назначения

Данько А. М., Турченко О. Ю.

ООО «КУАПП»

*121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1**adanko@qapp.tech, oturchenko@qapp.tech*

В работе рассматриваются возможности применения постквантовых криптографических алгоритмов в малоресурсных устройствах. Предлагаются аппаратно-программные решения для ускорения узких мест алгоритмов WOTS+C и «Гиперикум».

Ключевые слова: постквантовая криптография; аппаратное ускорение; криптографический сопроцессор; СФ-блок.

Введение

Несмотря на активное изучение постквантовых криптографических алгоритмов в Российской Федерации [1] и в мире [2], их внедрение усложняется из-за проблем, связанных с производительностью и большим размером ключей. В ряде современных областей данные проблемы могут быть несущественными и легко решаться путем горизонтального масштабирования вычислительных мощностей. Для ряда других устройств данная проблема может быть решена за счет программных оптимизаций. Например, при использовании SIMD-инструкций схема подписи Falcon может быть ускорена в 18–19 раз. Однако данные проблемы становятся критичными при использовании постквантовых алгоритмов в малоресурсных устройствах (таких как микроконтроллеры, смарт-карты, датчики и т. д.). Таким образом, в настоящей работе рассматривается возможный способ решения данной проблемы.

Ускорение узких мест в постквантовых криптографических схемах

В качестве алгоритма для ускорения рассматривалась отечественная схема подписи «Гиперикум» [3]. Схема «Гиперикум» является проектом методических рекомендаций в техническом комитете по стандартизации «Криптографическая защита информации» (ТК26) в группе по постквантовому криптографическому механизму [1]. Разработка способов ускорения основывалась на результатах анализа узких мест алгоритма [4]. Согласно полученным результатам около 87% времени работы алгоритма занимает функция хеширования. Первые попытки ускорения схемы были основаны на использовании криптографического сопроцессора, реализующего функцию хеширования «Стрибог» согласно ГОСТ Р 34.11-2012. Использование криптографического сопроцессора позволило ускорить алгоритм в 2,6 раз. В силу того что хешируемые данные имеют небольшой размер (один или два блока по 512 бит), то при существенном ускорении алгоритма хеширования «Стрибог» узким местом становится шина ввода-вывода данных. Для решения данной проблемы в настоящей работе исследуется возможность упаковки вызовов к функции хеширования «Стрибог» для снижения влияния времени ввода-вывода на общее время работы алгоритма. Важно отметить, что схема «Гиперикум» представляет собой

метасхему, включающую в себя ряд подсхем. Наиболее используемой подсхемой является схема одноразовой подписи WOTS+C [5]. Также стоит подчеркнуть, что в одном вызове схемы выработки ключа WOTS+C производится 1024 вызова функции хеширования «Стрибог». Более того, для вызова схемы выработки ключа WOTS+C необходимо передать менее 1 Кб данных. Таким образом, предлагается аппаратный ускоритель функций схемы одноразовой подписи WOTS+C в виде СФ-блока. Второй особенностью схемы WOTS+C и других подсхем алгоритма «Гиперикум», что они легко могут быть ускорены с помощью параллельного вычисления. Поэтому в рамках данного исследования разработан СФ-блок для параллельного вычисления алгоритмов WOTS+C и функций хеширования «Стрибог». Аналитические оценки эффективности разработанных СФ-блоков показывают существенный прирост производительности вычисления алгоритмов подписи «Гиперикум».

Заключение

В данной работе предлагается два новых СФ-блока, повышающих производительность алгоритмов подписи «Гиперикум». Использование таких блоков может нивелировать разрыв в производительности вычислений между постквантовыми и классическими криптографическими алгоритмами и позволит внедрять постквантовые алгоритмы в малоресурсные устройства.

Литература

1. Структура ТК26. — URL: <https://tc26.ru/about/structure> (дата обращения: 20.06.2024).
2. Post-Quantum Cryptography. URL: <https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography/selected-algorithms-2022> (дата обращения: 20.06.2024).
3. Turchenko O., Grebnev S. Hypericum: a post-quantum digital signature for standardization in Russia // *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques*, 2024. 1–29.
4. Перспективные подходы к аппаратному ускорению постквантовой криптографии. — URL: https://www.ruscrypto.ru/resource/archive/tc2024/files/03_tourcheno.pdf (дата обращения: 20.06.2024).
5. Hülsing A., Kudinov M., Ronen E., Yogev E. SPHINCS+C: Compressing SPHINCS+ With (Almost) No Cost // *Proceedings — 44th IEEE Symposium on Security and Privacy, SP 2023* (P. 1435–1453). Institute of Electrical and Electronics Engineers. URL: <https://doi.org/10.1109/SP46215.2023.10179381>.

УДК 681.54

Особенности автоматизации непрямого управления характеристиками инерционных живых объектов

Пожар К. В., Литинская Е. Л., Струкова Э. И., Чупраков Д. А.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

pozhar@bms.zone

Рассмотрена задача автоматизации непрямого управления с высокой константой времени нелинейным живым объектом. Предложена комбинация дискретного управления по возмущению с контролем выхода на основе предиктивной модели с горизонтом 10–12 ч и управления по обратной связи с ограниченной амплитудой.

Ключевые слова: автоматизация управления; оптимизация; нелинейный объект; управление концентрацией глюкозы.

Задача управления и контроля концентрации глюкозы в крови имеет прикладное значение в сфере медицины, а именно в области терапии людей с нарушениями функционирования естественных механизмов по снабжению клеток человеческого организма одним из наиболее важных веществ — глюкозой. Конечной целью внешнего управления концентрацией глюкозы в крови является компенсация нарушений функционирования указанных естественных механизмов, что может быть формализовано как поддержание целевой величины (концентрации глюкозы в крови) в диапазоне значений, соответствующих физиологической норме для данного человека.

Управление целевой величиной в такой системе осуществляется косвенно путем регулирования подачи в организм лекарственных средств, главным образом инсулина. При автоматизации управления системами доставки лекарственных средств также возникает задача автоматического определения оптимальной функции зависимости количества необходимого к введению лекарственного средства от времени.

При этом объект управления обладает рядом особенностей. В нем в значительной степени сохраняется естественная система управления даже при значительных нарушениях ее функционирования, таких как сахарный диабет, что обуславливает устойчивость объекта, причем устоявшееся значение ниже верхнего допустимого порога целевой величины. Динамика целевой величины существенно нелинейно зависит от внешних возмущений и от управляющего воздействия. Объект управления обладает высокой инерционностью, максимум отклика на импульсное возмущение (прием пищи) составляет более 1,5 часов при времени релаксации более 7 часов. В то же время константы времени отклика на управляющее воздействие, имеющее другую природу, примерно в два раза превышают время отклика на возмущения, то есть управление имеет высокое переходное запаздывание.

Несмотря на наличие технических средств обратной связи (мониторы глюкозы), управление только по обратной связи, например, с использованием ПИД-регуляторов приводит к чрезмерно высокому времени регулирования. Так, численные эксперименты показывают, что оптимальный ПИД-регулятор при приемлемом перерегулировании позволяет снизить время регулирования с 470 до 140 минут

по сравнению с программным управлением, что, однако, значительно уступает традиционным методам дискретного управления по возмущению, которые обеспечивают время регулирования в 100 минут. Кроме того, практически не снижается амплитуда предельного отклонения, являющаяся одним из критериев качества управления такими объектами. Ключевым недостатком управления по возмущению является отсутствие технических средств обратной связи, вследствие чего информация о возмущении может быть предоставлена только пользователем системы. Такая информация не обладает метрологической точностью, и ее применение несет риск принятия ошибочных решений. Перспективной является комбинация дискретного управления по возмущению с контролем выхода и непрерывного управления по обратной связи с ограниченной амплитудой.

Для оптимизации управления по возмущению предлагается использовать предиктивную нелинейную модель объекта управления. Численное моделирование показывает, что для оптимизации функции управляющего воздействия горизонт прогнозирования модели должен составлять 10–12 часов. В связи с этим модель должна быть построена на основе описания динамики физиологических процессов и должна учитывать процессы с долгосрочным эффектом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение от 19.01.2023 № 23-24-00461).

УДК 621.3.051.025

Сравнение методов динамической компенсации влияния смещений катушек на характеристики систем индуктивной передачи энергии к нейростимуляторам

Селютин Е. В.

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
orplyana@gmail.com*

Рассмотрены методы динамической компенсации влияния смещений катушек систем индуктивной передачи энергии к нейростимуляторам (подстройка входного напряжения, подстройка конденсаторов усилителя класса Е). Проведено сравнение указанных методов на основе результатов численного моделирования систем.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; индуктивная связь; усилитель мощности класса Е; имплантируемые медицинские приборы.

В настоящее время отмечается увеличение количества нейростимуляторов, используемых для лечения более различного типа [1]. Одним из основных способов реализации питания нейростимуляторов является использование систем индуктивной передачи энергии (ИПЭ). В передатчике таких систем возможно использовать усилитель мощности (УМ) класса Е [2]. Данный УМ имеет относительно простую схему, а также обеспечивает системам ИПЭ высокую общую эффективность.

Одним из главных недостатков систем ИПЭ с УМ класса Е является значительное изменение выходных характеристик в результате смещений катушек. Эти изменения могут привести как к некорректной работе нейростимулятора вплоть до его аварийного выключения, так и к повышению нагрева электронных компонентов систем ИПЭ, в результате которого у пациента возникает термический дискомфорт. Таким образом, актуальной является реализация динамической компенсации влияния смещений катушек для поддержания постоянной выходной мощности систем ИПЭ.

В работе рассмотрено несколько методов динамической компенсации влияния смещений катушек систем ИПЭ. В первом случае компенсация происходит за счет подстройки входного напряжения. Во втором случае компенсация реализуется за счет подстройки номиналов шунтирующего и последовательного конденсаторов в нагрузочной цепи УМ класса Е. Выполнено численное моделирование систем ИПЭ, в результате которого проведена оценка точности установки целевого значения выходной мощности, рассмотрены диапазоны изменения подстраиваемых параметров в зависимости от величины смещения катушек, а также проведена оценка быстродействия систем ИПЭ с используемыми методами динамической компенсации влияния смещений катушек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024).

Литература

1. Lin A., Shaaya E., Calvert J.S., Parker S.R., Borton D.A., Fridley J.S. A review of functional restoration from spinal cord stimulation in patients with spinal cord injury // *Neurospine*, 2022. Vol. 19. № 3. P. 703.
2. Ahmadi M. M., Sarbandi-Farahani M. A class-E power and data transmitter with on-off keying data modulation for wireless power and data transmission to medical implants // *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2020. Vol. 39. № 8. P. 4174–4186.

УДК 629.3.052.3:623.742.2:53.082.7:621.396.677

Перспективные методы антенных измерений для исследований и испытаний радиотехнических систем

Старовойтов Е. И.¹, Руссанов В. И.²¹ АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

info@i-progress.tech

² АО «Концерн «Вега»

121170, г. Москва, Кутузовский просп., 34

mail@vega.su

В работе представлены перспективные способы антенных измерений и предложены технические решения по их реализации, позволяющие провести оценку работоспособности различных приемо-передающих устройств на необорудованных испытательных площадках и полигонах без установки специальных сооружений, при отсутствии сигналов навигационных спутников для позиционирования радиоизмерительной аппаратуры, в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения и без использования командных радиолиний управления.

Ключевые слова: антенные измерения; диаграмма направленности; облетный метод; беспилотный летательный аппарат; привязной аэростат; навигация; позиционирование.

Введение

Испытания радиотехнических систем включают в себя юстировку электрической оси антенны, измерение ее диаграммы направленности (ДН) и последующую калибровку. Для выполнения этих операций традиционно использовались методы дальней зоны с вышками на оборудованных полигонах, а в настоящее время получили распространение альтернативные им методы ближнего поля и облетные методы [1, 2].

Методы антенных измерений

Измерения апертурно-зондовым методом в ближней зоне выполняются на стенде в условиях безэховой камеры. Однако после установки антенны на носитель и монтажа радиопрозрачного обтекателя результаты стендовых измерений могут искажаться.

Получить пространственную ДН антенны, установленной под радиопрозрачным обтекателем на носителе, позволяют измерения напряженности поля в дальней зоне, расстояние до которой составляет

$$r_{\min} = \frac{2D_A^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где D_A — максимальный размер излучающей апертуры антенны; λ — длина волны излучения.

Использование неподвижной вышки в дальней зоне имеет ряд ограничений: измерения выполняются при малых углах места исследуемой антенны, должно учитываться отражение от поверхности земли и местных предметов, затруднено

определение уровней боковых лепестков ДН. Кроме того, на территории испытательного полигона не всегда возможна постройка специальной вышки.

Более перспективно размещение измерительной антенны с поворотным устройством на подвижном шасси, за счет перемещения которого по заданной траектории осуществляются измерения ДН исследуемой антенны в азимутальной и частично в угломестной плоскостях. Такие средства измерений имеют простую конструкцию, высокую надежность и низкую стоимость.

Использование подвижного шасси связано с необходимостью обеспечения временной привязки взаимных угловых положений исследуемой и измерительных антенн, так как ошибки определения их взаимной ориентации приводят к неустраняемым погрешностям измерений ДН. При отсутствии сигнала глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) для позиционирования измерительной антенны и определения направления на фазовый центр исследуемой антенны могут быть использованы различные навигационные технологии, для сравнительной оценки которых предлагается использовать обобщенную функцию желательности, включающую три количественных и пять качественных показателей:

$$\Phi(x) = \prod_{i=1}^k \Phi_i(i) \cdot \sum_{j=4}^m \mu_j \cdot \Phi_j(x), \quad (2)$$

где $i = 1...3$; $k = 3$; $\mu_j = 0,2$; $j = 4...8$; $m = 5$.

Оценка показывает преимущества систем на основе электромагнитной индукции, использующих генератор высокой частоты и однопроводную линию передачи [3]. На базе этой технологии разработаны способ и система определения антенных характеристик на измерительной площадке для измерения ДН исследуемой антенны в азимутальной и угломестной плоскостях, позволяющие отказаться от использования вспомогательной антенны, а также выполнять измерения внутри экранированных сооружений [4].

Также очень информативными и пригодными для использования в условиях необорудованных испытательных площадок и полигонов являются облетные методы исследования формы ДН на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [5] и беспилотных привязных аэростатов [6]. Аэростаты дешевле, невосприимчивы к мощному электромагнитному излучению, могут дольше находиться в воздухе, а БПЛА могут маневрировать при выполнении измерений и более устойчивы к ветровым нагрузкам.

Недостатки использования БПЛА и привязных аэростатов связаны с необходимостью использования ГНСС и дифференциальных поправок от контрольно-корректирующих станций, при этом БПЛА управляется по командной радиолинии, а привязной аэростат — через кабель-трос.

Представляет интерес использование оптических методов навигации и позиционирования, позволяющих снизить влияние радиопомех и обеспечить независимость от наличия сигнала ГНСС.

Заключение

Направление дальнейших работ представляет собой усовершенствование методов антенных измерений в части повышения точности результатов измерений, автономности измерительных средств, их независимости от внешней электромагнитной обстановки (ЭМО) и метеорологических условий, что должно позволить создать роботизированные комплексы антенных измерений, обладающие высокими



степенью готовности, оперативностью применения, мобильностью и не требующие постоянного контроля человека-оператора.

Литература

1. Александров А. И., Бобровник Г. А., Еременко А. С. и др. Эксплуатация радиотехнических комплексов / Под ред. А. И. Александрова. — М.: Советское радио, 1976. — 280 с.
2. Захарьев Л. Н., Леманский А. А., Турчин В. И. и др. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Под ред. Н. М. Цейтлина. — М.: Радио и связь, 1985. — 368 с.
3. Способ навигации транспортной и технологической машины по однопроводной линии радиопередачи. Заявка на изобретение № 2023107633. Приоритет от 29.03.2023 / АО «НИИМА «Прогресс» / Николаев А. В., Старовойтов Е. И., Кондрашов З. К., Скиба Е. С., Амбарян А. А., Бодунов Д. М., Прохоркин Д. А., Колесников А. В., Федосова Н. Б. Патент № 2814649.
4. Способ и система определения антенных характеристик на измерительной площадке. Заявка на изобретение № 2023112094. Приоритет от 11.05.2023 / ФГБУН ИМАШ РАН / Николаев А. В., Старовойтов Е. И., Руссанов В. И., Бодунов Д. М., Филин М. А., Крюков М. В., Гончаров Н. С., Колесников А. В., Федосова Н. Б., Али Ахмат, Нгуен Ван Кыонг, Фам Дык Хи. Патент № 2804836.
5. Старовойтов Е. И., Руссанов В. И. Перспективные технологии облетных методов радиотехнических измерений. Радиостроение, 2022. — № 1. — С. 1–30. — URL: <https://doi.org/10.36027/rdeng.0122.0000204>.
6. Способ и система антенных измерений с использованием беспилотного привязного аэростата. Заявка на изобретение № 2023125399. Приоритет от 04.10.2023 / ФГБУН ИМАШ РАН / Николаев А. В., Старовойтов Е. И., Руссанов В. И., Бодунов Д. М., Филин М. А., Крюков М. В., Гончаров Н. С., Колесников А. В., Федосова Н. Б., Али Ахмат, Нгуен Ван Кыонг, Фам Дык Хи. Патент № 2818996.

УДК 621.396.96

Алгоритм обеспечения функциональных характеристик РЛС для работы в режиме сверхразрешения космических объектов

К. т. н. Перлов А. Ю.*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**laperlov@yandex.ru*

Приведено описание алгоритма обеспечения функциональных характеристик РЛС в режиме сверхразрешения космических объектов. Показано, что тепловые воздействия внутри аппаратуры РЛС, а также помеховые воздействия приводят к искажению амплитудно-фазового распределения при приеме отраженного сигнала.

Ключевые слова: РЛС; космический объект; сверхразрешение целей; тепловые процессы; функциональные характеристики.

Неуклонное развитие космического пространства в совокупности с ростом числа космических объектов обуславливает необходимость развития средств мониторинга. Одним из наиболее эффективных средств для обеспечения непрерывного мониторинга являются радиолокационные станции (РЛС). Для обнаружения и сопровождения космических объектов на дальностях порядка несколько тысяч километров современные РЛС строятся на основе крупноапертурных и высокопотенциальных активных фазированных антенных решеток (АФАР) [1].

Повышение частоты зондирующих сигналов РЛС в совокупности с применением широкополосных сигналов создает основы для реализации режима сверхразрешения целей. Для реализации требований к алгоритмам сверхразрешения целей необходимо обеспечить минимальный разброс амплитудно-фазового распределения в приемо-передающих трактах РЛС [2].

Вместе с тем современные условия функционирования в совокупности с плотной компоновкой аппаратуры РЛС обуславливают возникновение деструктивных воздействий различной природы. Одним из критических сочетаний деструктивных воздействий, влияющих на точностные характеристики, является рост тепловыделения в аппаратуре усиления сигналов, а также помеховые воздействия в зоне обзора РЛС, что приводит к искажению амплитудно-фазового распределения при приеме отраженного сигнала.

В целях обеспечения точностных характеристик предложен интеллектуальный алгоритм, который, в отличие от известных:

- основан на формализации искажения АЧХ от тепловых процессов в виде дифференциальных уравнений;
- определяет закономерности изменения диаграмм направленности АФАР при флюктуациях амплитуд и фаз сигналов в аппаратуре усиления сигналов под действием тепловых процессов;
- формирует обучающую выборку по данным о параметрах широкополосных сигналов и вкладе деструктивных воздействий на сквозной АЧХ;
- прогнозирует неидентичность АФР с использованием методов машинного обучения.

Литература

1. Ступин Д. Д., Перлов А. Ю., Маврин А. В. Исследование и испытания передающих комплексов АФАР для обеспечения тактико-технических характеристик РЛС // Известия ЮФУ. Технические науки, 2018. — № 3 (197). — С. 143–155. DOI: 10.23683/2311-3103-2018-3-143-155.
2. Разиньков С. Н., Перлов А. Ю., Захаров А. С., Темник Я. А. Оперативная калибровка активных фазированных антенных решеток наземных радиолокационных станций // Воздушно-космические силы. Теория и практика, 2024. — № 29. — С. 94–102.

УДК 621.3.087.9

Применение аналого-информационного преобразователя в FMCW MIMO-радаре

Карпов В. Н., Мелёшин Ю. М., Лялин К. С.*ООО «Квантум-ЦТ»**127540, г. Москва, ул. Дубнинская, 12А*

Рассмотрена возможность применения аналого-информационного преобразователя в FMCW MIMO-радаре Ka-диапазона частот, позволяющего существенно сократить объем информационного потока на каждом приемном канале системы. Экспериментально показана возможность сокращения информационного потока более чем в четыре раза на примере одноканального FMCW-радара.

Ключевые слова: FMCW MIMO; аналого-информационный преобразователь; сжатая выборка.

Одной из сложностей построения радиотехнических систем, основанных на технологии множественного входа и множественного выхода (MIMO) [1], является оцифровка большого потока данных на каждом приемном канале системы, поскольку большое количество выборок аналого-цифрового преобразователя (АЦП) напрямую влияет на объем информационного потока между АЦП и вычислителем. Одним из подходов, который способствовал бы уменьшению этого потока, может быть применение аналого-информационного преобразователя (АИП) [2–7], основанного на теории сжатой выборки, который может существенно сократить поток данных, передаваемых на вычислительное устройство, за счет оцифровки с частотой дискретизации, меньшей, чем удвоенная максимальная частота самого сигнала.

В данной работе рассмотрена возможность применения АИП в MIMO-радиолокаторе Ka-диапазона частот на базе технологии непрерывного излучения с линейной частотной модуляцией. В работе представлено моделирование, а также экспериментальная отработка предложенных решений, в ходе которой показана возможность сокращения частоты дискретизации АЦП с 4 до 1 МГц при максимальных частотах принимаемого сигнала 2 МГц на одноканальном макете FMCW-радара.

Литература

1. Kueppers S. et al. A compact 24×24 channel MIMO FMCW radar system using a substrate integrated waveguide-based reference distribution backplane // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020. Vol. 68. № 6. P. 2124–2133.
2. Tropp J. A. and Gilbert A. C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit // IEEE Transactions on Information Theory, 2007. Vol. 53. № 12. P. 4655–4666.
3. Laska J. N. et al. Theory and implementation of an analog-to-information converter using random demodulation // 2007 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, USA, 2007. P. 1959–1962.

4. Meleshin Y. M. et al. Application of an analog-to-information converter in multichannel radio systems // 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), Yekaterinburg, Russian Federation 2023. P. 143–146.
5. Fudge G. L., Bland R. E., Chivers M. A., Ravindran S., Haupt J. and Pace P. E. A Nyquist folding analog-to-information receiver // 2008 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA. P. 541–545, 2008.
6. Meleshin Y. M. et al. Application of an analog-to-information converter algorithm in FMCW MIMO radar // 2024 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), Yekaterinburg, Russian Federation 2024. P. 163–165.
7. Быкова А. В., Полунин М. Н. Аналого-информационный преобразователь с неравномерной дискретизацией на базе АЦП последовательного приближения // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — С. 325–332.

УДК 629.1.05

Система контроля характеристик комплекса пассивной безопасности транспортных средств

Веселовский Р. А., Саури А. Д., Клоков В. А., Сарайкин А. И.*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**115409, г. Москва, Каширское ш., 31**romantit047@mail.ru*

Комплекс пассивной безопасности представляет собой ключевое звено любого транспортного средства, обеспечивающее снижение травматизма водителя и пассажиров в случае аварии. Контроль его работоспособности является важной с точки зрения безопасности задачей. В настоящей работе представлена разработанная электронная система, позволяющая проводить независимый контроль, диагностику и измерение параметров компонент системы пассивной безопасности транспортного средства.

Ключевые слова: комплекс пассивной безопасности; транспортное средство; пассивная безопасность; система пассивной безопасности; комплекс контроля.

Особенностью современных транспортных средств, в том числе легковых автомобилей, является наличие достаточно сложной системы обеспечения пассивной безопасности SRS — Supplementary Restraint System. Она предназначена для снижения тяжести травм водителя и пассажира ТС в случае аварии. В состав системы SRS входят надувные подушки безопасности (ПБ), ремни безопасности (РБ), оборудованные преднатяжителями, датчик акселерометра, датчики удара и давления, расположенные в салоне и кузове автомобиля.

На основе изученных данных о структуре и составе системы SRS было разработано электронное устройство, проводящее полнофункциональную диагностику и тестирование алгоритма срабатывания системы (далее — устройство). Структурная схема устройства представлена на рис. 1.

Ключевыми элементами устройства являются:

- 1) микроконтроллер DD1, обеспечивающий работу устройства и осуществляющий управление всеми узлами посредством двух независимых интерфейсов SPI в соответствии с алгоритмом;
- 2) драйверы пиропатронов DA16, DA17, обеспечивающие управление запалом пиротехнических каналов;
- 3) сенсоры акселерометра (DA11) и гироскопа (DA12), обеспечивающие сбор данных для работы алгоритма (предел измерений датчика акселерометра составляет 150g);
- 4) PSI5-трансиверы (DA10, DA13), обеспечивающие возможность подключения внешних датчиков удара и давления посредством интерфейса PSI5 rev. 2.1 через четыре независимых асинхронных канала;
- 5) CAN-трансивер (DA9), предназначенный для обеспечения связи по шине CAN с протоколом реализации диагностического канала в соответствии со стандартом ISO/DIS 15765.

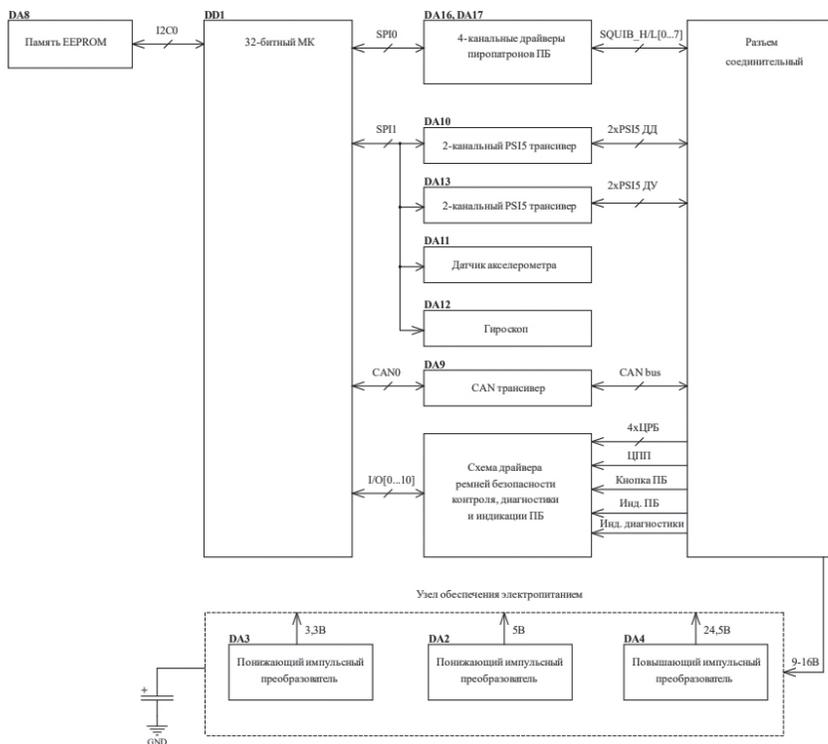


Рис. 1. Структурная схема устройства: МК — микроконтроллер;

ПБ — подушка безопасности; ДД — сигнал датчика давления; ДУ — сигнал датчика удара;
ЦРБ — вход цепи ремня безопасности; ЦПП — вход цепи наличия пассажира

Микроконтроллер в режиме реального времени получает данные со встроенных датчиков акселерометра и гироскопа, а также с внешних датчиков удара и давления, расположенных в кузове и салоне ТС. Обработанные данные сравниваются с заданными порогами ускорений, в результате чего принимается решение о разворачивании пиротехнических каналов компонент системы в соответствии с матрицей TTF (англ. Time To Fire — время до взрыва). Степень тяжести аварии определяется модулем вектора ускорения. Диагностические данные передаются непосредственно по шине CAN.

Задачей узла обеспечения электропитанием является формирование требуемых внутренних номиналов питания от бортовой электрической сети ТС номиналом $13,5 \pm 0,5$ В по ГОСТ P52230-2004.

В ходе исследования были разработаны электрическая принципиальная схема и топология печатной платы. Внешний вид устройства представлен на рис. 2.

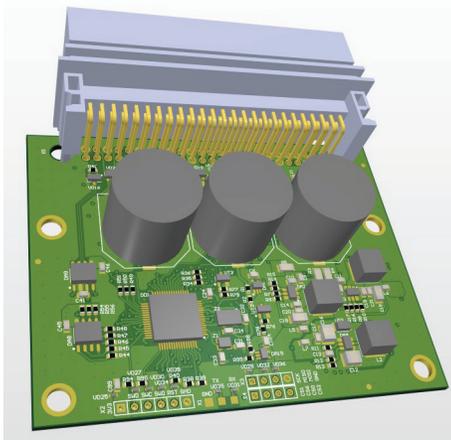


Рис. 2. Внешний вид устройства

Разработанное устройство соответствует стандартам безопасности по ГОСТ Р 51709-2001.

Габаритные размеры — $(111\pm 0,1)\times(31,8\pm 0,1)\times(104,4\pm 0,1)$ мм, масса составляет не более 220 г.

Разработанное устройство имеет следующие электрические характеристики:

- 1) диапазон входных напряжений — от 9 до 16 В;
- 2) номинальное напряжение питания — 13,5 В;
- 3) рабочий ток при напряжении питания $13,5\pm 0,5$ В — не более 0,25 А;
- 4) ток развертывания компонентов удерживающей системы пассивной безопасности — не менее 1,2 А;
- 5) рабочий диапазон сопротивления цепей компонентов удерживающей системы составляет 1,7–2,3 Ом;
- 6) коммуникация по шине CAN — в диапазоне напряжения от 7,0 до 18,0 В;
- 7) максимальный пусковой ток — 2,6 А в течение 50 мс.

Выходы устройства обеспечены защитными элементами в соответствии со стандартами ЭМС ISO 7637-3 и ISO 1060.

Описанная в настоящей работе система контроля характеристик комплекса пассивной безопасности позволяет проводить диагностическую проверку всех компонент системы SRS TC, измерение электрических параметров системы, а также непосредственный запуск пиротехнических каналов ПБ и преднатяжителей РБ в соответствии с заданным алгоритмом. Система рассчитана на восемь каналов (шесть каналов подушек безопасности и два канала преднатяжителей РБ водителя и переднего пассажира).

Литература

1. Савич Е.Л., Капустин В.В. Системы безопасности автомобилей: Учеб. пособие. — Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. — 445 с.: ил.

2. Хусаинов А. Ш., Кузьмин Ю. А. Пассивная безопасность автомобиля: учебное пособие для студентов направлений 190100.62 «Наземные транспортно-технологические комплексы» по профилю «Автомобиле- и тракторостроение» и 190109.65 «Наземные транспортно-технологические средства» по специальности «Автомобили и тракторы». — Ульяновск: УлГТУ, 2011. — 89 с.
3. ГОСТ Р52230-2004. Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия: национальный стандарт Российской Федерации, дата введения 2004-03-01 / Технический комитет по стандартизации ТК 56 «Дорожный транспорт». — Изд. официальное. — Москва: Стандартинформ, 2008. — 69 с.

УДК 621.317

Метод измерения характеристик устройств основной полосы частот с выбросом на плоской вершине переходной характеристики

Полторыхин К. М.^{1,2}, Семенов Э. В.^{1,2}

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
kpoltorykhin@inbox.ru

² Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, Академический просп., 2/3

В докладе рассмотрен метод для измерения характеристик нелинейных устройств основной полосы частот с выбросом на плоской вершине. Метод заключается в косвенном измерении характеристик элементов нелинейной эквивалентной схемы второго порядка, имеющей схожую переходную характеристику с измеренной. Показано, что, устанавливая точку стробирования в разные моменты времени, можно независимо определить характеристики всех элементов эквивалентной схемы.

Ключевые слова: устройства основной полосы частот; косвенные измерения; нелинейный характеристический график.

В настоящее время для измерения характеристик нелинейно-инерционных устройств используются X-параметры, которые позволяют не учитывать внутреннюю структуру измеряемого устройства. Однако использование X-параметров исключает характеризацию устройств в основной полосе частот, когда диапазон частот достаточно широк. В области основной полосы частот можно использовать измерители вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик для диодов, транзисторов и т. д. Недостаток использования таких измерителей заключается в том, что необходимо знать внутреннюю структуру объектов измерения, а это неудобно для измерений характеристик устройств в целом.

Известен метод измерения характеристик устройств основной полосы частот путем сопоставления им нелинейной эквивалентной схемы первого порядка [1]. Для характеристики устройств используются характеристики элементов эквивалентной схемы — вольт-амперная и кулон-вольтовая характеристики (КФХ). Соответствующий фильтр первого порядка способен учитывать статическую нелинейность цепи и зависимость скорости переходного процесса от входного сигнала. Характеристические функции (ВАХ, КФХ) для данного фильтра вычисляются с помощью косвенных измерений по семейству переходных характеристик устройства. Недостатком такого метода является то, что он удовлетворительно может описать нелинейность на фронте сигнала, но не учитывает выброс на плоской вершине.

Для описания устройств с переходными характеристиками и выбросом на плоской вершине подойдет использование эквивалентной схемы нелинейного фильтра второго порядка (рис. 1а) [2]. Отличие от первого порядка заключается в добавлении индуктивности в схему, которая позволяет описать выброс на плоской вершине. К набору характеристических функций добавляется вебер-амперная характеристика (ВБАХ). Расчет отклика модели устройства происходит согласно

структурной схеме, представленной на рис. 1б. Сложность измерения в данном случае состоит в том, что емкость и индуктивность частично компенсируют друг друга за счет противоположных импедансов. Это приводит к тому, что измерить их характеристики независимо довольно сложно. Поэтому для вычисления КФХ и ВБАХ приходится пользоваться рекурсивным или вариационным методом.

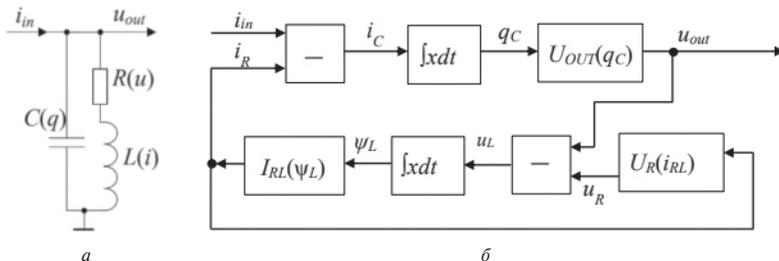


Рис. 1. Нелинейная эквивалентная схема второго порядка (а) и соответствующий ей нелинейный рекурсивный фильтр (б)

В данном докладе предлагается метод, при котором КФХ и ВБАХ определяются независимо по переходным характеристикам устройства, что можно рассматривать как косвенные измерения. Для проверки метода использовался осциллограф NI PXI-5114, его переходные характеристики представлены на рис. 2. Предложенный метод заключается в том, что ВАХ вычисляется установкой точки стробирования на плоской вершине, как это предлагается для цепи первого порядка (рис. 2, точка стробирования в момент времени 12 нс). Для нахождения КФХ мы устанавливаем точку стробирования в начале переходного процесса (рис. 2, точка стробирования в момент времени 2,7 нс). Это позволит оценить емкостное воздействие вне зависимости от действия индуктивности, когда она еще не участвует в переходном процессе и ее влияние минимально, но при этом допускается перегрузка на некоторых кривых в семействе переходных характеристик.

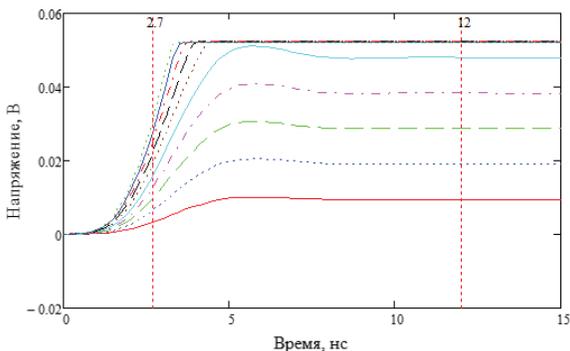


Рис. 2. Семейство переходных характеристик осциллографа NI PXI-5114

Данный метод позволяет приблизиться к характеристике нелинейных устройств нелинейными рекурсивными фильтрами высоких порядков и использовать полученную систему характеристик в разработке характеристики для инженерной оценки статической и динамической нелинейности устройств в основной полосе частот.

*Работа выполнена в рамках государственного задания
Министерства науки и высшего образования №FWRM-2024-0001.*

Литература

1. Назаров М. А., Семенов Э. В. Минималистичная система характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств и ее измерение // Изв. высш. учеб. заведений России. Радиоэлектроника, 2023. — Т. 26. — № 4. С. 123–132.
2. Semyonov E. V. Simple behavioral model of baseband pulse devices in the form of a second-order nonlinear recursive filter // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, June 2021. Vol. 68. № 6. P. 2192–2196.



УДК 621.318.43

Оптимизация систем индуктивного питания имплантируемой электроники с помощью алгоритма адаптивного поиска восхождением к вершине

Морозов А. В., Данилов А. А.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

and.morozov.v@gmail.com

Предложен новый критерий оптимизации систем индуктивного питания имплантируемой электроники. С использованием предложенного критерия разработан эвристический алгоритм оптимизации геометрии катушечной пары в составе таких систем. Показано, что алгоритм позволяет получать решения для систем индуктивного питания с характеристиками, соответствующими системам индуктивного питания имплантируемой электроники.

Ключевые слова: эвристические алгоритмы; оптимизация размеров катушек индуктивности; проектирование систем индуктивного питания.

Классическими критериями для оптимизации систем индуктивного питания являются эффективность передачи энергии и выходная мощность [1]. Системы индуктивного питания работают в области сверхкритической связи. Такая область характеризуется ростом выходной мощности до точки критической связи, при этом эффективность передачи энергии в этой области больше 50%. Такая связь выходных характеристик может быть использована как критерий оптимизации геометрии катушечной пары.

Провести оптимизацию по предложенному критерию можно с помощью эвристического алгоритма адаптивного поиска восхождением к вершине [2, 3]. Алгоритм обладает рядом настраиваемых параметров: особь, функция приспособленности, критерий отбора, критерий останова, оператор мутации, вероятность мутации признака особи (r_m). Ключевым оператором является критерий отбора, который позволяет отбирать особи (решения) с пиком выходной мощности, приближающимся ближе к правой границе боковых смещений:

$$P_L(\rho) \in [P_{L\min}; P_{L\max}] \text{ и } [P_{L\max}(\rho^*); \rho^* > \rho^0],$$

где ρ — боковое смещение, $P_{L\max}$, $P_{L\min}$ — требуемый максимальный и минимальный уровни выходной мощности.

Для тестирования разработанного эвристического алгоритма были отобраны восемь тестовых случаев [4]. Каждый случай описывал систему питания с разным уровнем выходной мощности и разной рабочей частотой. С помощью алгоритма были получены решения со стабильным питанием ($dP_L = 2-15\%$) относительно требуемого диапазона ($dP_{L\text{преб.}} = 20-30\%$) и высокой эффективностью передачи энергии (больше 50%) на заданном диапазоне боковых смещений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024).

Литература

1. Jow U. M., Ghovanloo M. Design and optimization of printed spiral coils for efficient transcutaneous inductive power transmission // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2007. Vol. 1. № 11. P. 5292–5305.
2. Скиена С. С. Алгоритмы. Руководство по разработке. — СПб: БХВ-Петербург, 2023. — 455 с.
3. Simon D. Evolutionary Optimization Algorithms // The Willey Publishing, 2013. 57 p.
4. Danilov A. A., Aubakirov R. R., Mindubaev E. A., Gurov K. O., Telyshev D. V., Selishchev S. V. An algorithm for the computer aided design of coil couple for a misalignment tolerant biomedical inductive powering unit // IEEE Access, 2019. Vol. 7. P. 70755–70769.

УДК 621.37

Архитектура прототипа интегрального модуля управления диаграммой направленности сверхширокополосных антенных систем на базе элементов фотоники

Ушакова Е. В., Токмаков А. С., Батурин Г. А., Цветков В. К., к. т. н.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

институт микроприборов и систем управления

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

katrinna.ushakova@yandex.ru

Разработана архитектура прототипа интегрального модуля, проведено его моделирование. Получены фазовые программы формирователя луча диаграммы направленности для двухканальной антенной решетки. Описана математическая зависимость между минимальным шагом отклонения луча диаграммы направленности и шагом перестройки фазового модулятора.

Ключевые слова: диаграмма направленности; фазированные антенные решетки; системы связи; фотоника; радиофотоника.

Тренд на увеличение числа абонентов систем связи, повышение требований к пропускной способности, разрешающей способности радаров и систем радиовидения влечет расширение рабочей полосы частот, что затрудняет или исключает использование сканирующих антенных решеток на базе классических фазовращателей ввиду неоднородности их фазовой характеристики.

Способом решения описанной проблемы может служить интегральный модуль управления ДН с преобразованием сигнала в оптическом диапазоне, где относительная ширина полосы сравнительно мала, фазовые характеристики стабильны и управление ведется сразу несколькими каналами АР. Интегральное исполнение обеспечит снижение массогабаритных характеристик, энергопотребления, а при серийном производстве также и стоимости аппаратуры наземной и спутниковой радиосвязи, радиолокации (в том числе ДЗЗ), ВЧ-интерфейсов сетей 5G и 6G, базовых станций, радиосистем ADAS.

В рамках данной работы:

- проведено исследование вариантов реализации прототипа интегрального модуля;
- разработана структурная схема прототипа;
- проведено моделирование параметров прототипа;
- произведена калибровка, настройка драйвера лазерного диода и его тестовый запуск.

В результате выполнения работы получены фазовые программы формирователя луча диаграммы направленности для двухканальной антенной решетки с различными характеристиками. Описана математическая зависимость между минимальным шагом отклонения луча диаграммы направленности и шагом перестройки фазового модулятора. Получена фазовая программа для двухканальной антенной решетки с межэлементным расстоянием, равным $0,5\lambda$ на частоте 12 ГГц.

Литература

1. Урик В. Дж.-мл., МакКинни Д. Д., Вильямс К. Дж. Основы микроволновой фотоники. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016.
2. Grootjans R. et al. Broadband Continuously Tuneable Delay Microwave Photonic Beamformer for Phased Array Antennas // 2019 14th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), Paris, France, 2019. P. 258–261. DOI: 10.23919/EuMIC.2019.8909572.



УДК 621.396.969.32

Перспективы разработки и применения бортовых радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли для БПЛА

Цветков В. К., Кузьмин И. А., Лялин К. С.

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

Приведены результаты анализа современного состояния развития отрасли проектирования и эксплуатации малогабаритных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) для применения на борту беспилотных летательных аппаратов и малых пилотируемых летательных аппаратов. Приведены данные о текущей эксплуатации РСА на борту тропосферных носителей, потенциальных вариантах и областях применения, потребностях рынка, рассмотрены некоторые текущие наукоемкие задачи, потенциально решаемые РСА. Рассмотрены способы поставки оборудования под нужды заказчика, модели предоставления услуг радиолокационной съемки.

Ключевые слова: РСА; радар; радиолокатор с синтезированной апертурой; БПЛА; радиолокационное изображение; СВЧ; усилители.

Рынок ДЗЗ с использованием БПЛА активно развивается. По данным Совзонд (ссылается на senseFly), рынок только сельхоздронов ДЗЗ в мире оценен в \$32 млрд и продолжает расти [1]. Результат анализа объема и динамики выручки коммерческих компаний рынка ДЗЗ России GISGeo, по данным с 2015 по 2018 годы, дает представление о сложившихся трендах на рынке: наблюдается уверенный рост коммерческого рынка ДЗЗ с БПЛА (по состоянию на 2018 год общий объем коммерческого гражданского рынка ДЗЗ составил приблизительно 7,5–8 млрд рублей) [2].

Нишевая часть рынка ДЗЗ с использованием БПЛА — поставка оборудования ДЗЗ, в том числе радиолокационного. В настоящее время наблюдается тенденция к интеграции множества инструментов ДЗЗ в комплексы мониторинга [3]. Таким образом, целевой потребитель аппаратуры или услуг по разработке/интеграции оборудования — компании — разработчики бортовых комплексов ДЗЗ, компании, оказывающие услуги по проведению съемки.

Проведение радиолокационной съемки — продукт, органично вписывающийся в рынок получения и обработки данных ДЗЗ. По данным Иннополиса, ожидается рост рынка предоставления услуг ДЗЗ в мире до 3,6 млрд долларов в год (прогноз на 2023 год), где емкость российского сегмента рынка оценена в 0,2 млрд долларов в год при менее 10% текущего занимаемого объема [4]. Однако с учетом тенденции к комплексированию средств ДЗЗ имеет смысл указать на высокую степень диверсификации методов съемки, что приводит к дроблению рынка услуг обработки данных ДЗЗ либо его монополизации компаниями-разработчиками (владельцами интеллектуальной собственности) комплексов ДЗЗ.

По данным отчета сервиса GMI (Global market insights), рынок РСА на 2022 год составляет порядка \$5,5 млрд. К 2032 году ожидается рост до \$15 млрд (рис. 3.1) [5]. Согласно отчету, наибольший интерес представляют решения X-диапазона частот. В то же время динамика роста наибольшая у РСА S-диапазона частот. По данным

из того же отчета, сегмент рынка РСА, использующий БПЛА в качестве носителя, в 2022 году составил порядка 20% от общего рынка РСА, что составляет порядка \$1 млрд. При этом рост этого сегмента рынка в абсолютном выражении ожидается до 10% в год. Ключевыми игроками отрасли названы компании Airbus, Aselsan, BAE Systems, Capella Space, Leonardo SPA, Lockheed Martin Group и др.

По данным отчета сервиса Exactitude consultancy [6], ожидается менее оптимистичный рост — до 6,76 млрд долларов США к 2029 году (проанализирован период с 2020 по 2029 гг.), тем не менее агентство также дает высокую оценку роста рынка на 9,5% в год. Важно отметить, что, по данным того же отчета на 2021 год, ключевая доля рынка РСА сосредоточена в Северной Америке (порядка 37%). Детальной информации о распределении оставшейся части рынка сервис не предоставляет, тем не менее указано, что среди анализируемых регионов есть и РФ.

Сервис Market research future предоставляет данные, в соответствии с которыми рынок РСА к 2030 году достигнет отметки 13,4 млрд долларов США [7]. Среди факторов влияния на рынок указана эпидемия COVID-19. Драйвером роста рынка РСА указано интенсивное развитие рынка ВПК. Отдельно отмечена нишевая возможность — создание двухдиапазонных радиолокаторов. В отчете приведены ключевые сделки и события наиболее крупных игроков на рынке. Так, например, в 2020 году компания ImSAR поставила 150 радаров типа NSP-7 на БПЛА типа Primoco (Чехия).

Анализ изученных материалов, прямые и косвенные оценки, тенденции в РФ к цифровизации большинства отраслей хозяйствования, инновации в промышленности в темпах соизмеримых с усредненным мировым темпом позволяют сделать вывод о соизмеримом росте гражданского рынка РСА БПЛА в РФ. Драйвером роста гражданского рынка считается развитие интересов в Арктической зоне, освоение удаленных месторождений.

Широта применения радиолокационного ДЗЗ позволяет выйти на очень гибкий рынок продаж, где станет возможным реализовывать продукт как единичными экземплярами, так и крупной серией. Технология производства в целом позволяет масштабировать объемы изготовления радара от единиц шт. до 1000 шт. и более в год в краткие сроки, адаптируя предложение под растущий спрос.

Литература

1. URL: <https://sovzond.ru/press-center/news/bpla/7871>.
2. URL: <https://www.gisgeo.org/research/analitika/obem-i-dinamika-vyruchki-kommercheskih-kompanij-rynka-dzz-rossii-s-2015-po-2018-gody.html>.
3. URL: https://www.comnews.ru/content/214042/2021-04-12/2021-w15/buduschee-dzz-kompleksnosti?utm_source=telegram&utm_medium=general&utm_campaign=general.
4. URL: http://www.imodel-russia.com/upload/MR2018_dokladi/MR2018_NTI_Gershenson.pdf.
5. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/synthetic-aperture-radar-sar-in-space-sector-market>.
6. URL: <https://exactitudeconsultancy.com/reports/19200/synthetic-aperture-radar-market>.
7. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/synthetic-aperture-radar-market-10959>.



УДК 004.052

Сокращение задержки передачи данных через PCI-E с помощью стандарта CXL

Солодовников А. П., Силантьев А. М., Переверзев А. Л.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
heroh@org.miet.ru

Выполнен обзор стандарта Compute Express Link (CXL) на предмет использования в программно-аппаратном комплексе (ПАК) ускорения моделирования цифровых СБИС в целях сокращения задержки передачи данных по интерфейсу PCI-E и, как следствие, повышения общей производительности ПАК.

Ключевые слова: CXL; PCI-E; эмуляция; моделирование; верификация.

Увеличение степени интеграции систем на кристалле и цифровой аппаратуры обеспечило значительный рост производительности и расширение функциональных возможностей изделий, что привело к усложнению процесса их проектирования. Возросла значимость процесса верификации создаваемых изделий, на который может быть направлено более 50 % ресурсов проекта [1]. Ускорение процесса верификации является актуальной задачей, для решения которой ведущие разработчики САПР создают специализированные программно-аппаратные комплексы, позволяющие воспроизводить функционирование RTL-описания аппаратуры с реальными тактовыми частотами до единиц МГц. Такие частоты обеспечивают на несколько порядков большую [2] скорость выполнения тестов по сравнению с симуляцией. Эти устройства называются эмуляторами и в связи со своей дороговизной могут использоваться только крупными компаниями. В то же время важно отметить доступность инструментов маршрута проектирования для отдельных студентов, университетов, малых и средних компаний. Однако для использования полноценного маршрута проектирования не хватает инструментария для ускорения моделирования, что привело к разработке программно-аппаратного комплекса для ускорения моделирования [3].

В текущей реализации главным ограничением в увеличении производительности комплекса стала задержка передачи данных от симулятора к FPGA-ускорителю и обратно по интерфейсу по PCI-E. Еще одним недостатком комплекса является сложность программного драйвера СФ-блока XDMA в использовании. Так, этот драйвер работает в пространстве ядра операционной системы, обращении к драйверу из приложений пользовательского пространства добавляет накладные расходы во время обмена данными с ускорителем. В поисках способов по оптимизации задержки передачи данных был изучен стандарт Compute Express Link (CXL), предназначенный для замены канального уровня стандарта PCI-E, используемого для обмена данными между центральным процессором и различными ускорителями в высокопроизводительных системах поверх физического уровня PCI-E. В работе выполнен обзор стандарта CXL на предмет использования в программно-аппаратном комплексе в целях повышения его общей производительности, а также предложен метод интеграции одного из протоколов стандарта CXL — CXL.cache и рассмотрен механизм программной интеграции симулятора и обмена информацией через интерфейс CXL.

Литература

1. The Weather Report: 2018 Study On IC/ASIC Verification Trends. URL: <https://semiengineering.com/the-weather-report-2018-study-on-ic-asic-verification-trends> (дата обращения: 10.07.24).
2. Pre-Silicon Verification Using Multi-FPGA Platforms. URL: <https://doi.org/10.1007/s10836-021-05929-1> (дата обращения: 11.08.21).
3. Солодовников А. П., Переверзев А. Л., Силантьев А. М. Программно-аппаратный комплекс для ускорения функциональной верификации систем на кристалле // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2023. — Т. 28. — № 4. — С. 441–451. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-4-441-451. EDN NULBAQ.



УДК 621.317.7

Метод повышения точности аналого-цифрового преобразования сигналов без потери быстродействия: теория и практическая реализация

Косенко В. А., д. т. н. Савченко Ю. В.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
paper@bbbf.ru

Представлен метод повышения точности аналого-цифрового преобразования сигналов без потери быстродействия. Практическая реализация метода подтвердила его эффективность и применимость в реальных системах.

Ключевые слова: аналого-цифровое преобразование; АЦП; повышение точности; параллельная оцифровка; шум квантования; смещение сигнала; масштабирование сигнала; многоканальная оцифровка.

Современные системы обработки сигналов требуют высокой точности аналого-цифрового преобразования (АЦП) без потери быстродействия [1]. В данном докладе представлен метод повышения точности АЦП за счет особой подготовки входного сигнала. Метод включает разделение входного сигнала на составляющие для их параллельной оцифровки, что позволяет минимизировать шум квантования и тем самым увеличить разрядность преобразования [2].

Для реализации метода входной сигнал разделяется на несколько составляющих, каждая из которых обрабатывается отдельным каналом АЦП. Это позволяет оптимально использовать диапазон каждого устройства АЦП и повысить общую точность преобразования. Для каждого канала вычисляются параметры смещения и масштабирования. Смещение адаптирует базовый уровень сигнала к начальному уровню диапазона устройства АЦП, а масштабирование обеспечивает соответствие амплитуды сигнала диапазону устройства АЦП.

Также рассмотрено введение перекрытия между соседними каналами для устранения проблем с обнаружением сигнала на границах диапазонов. Для реализации смещения и масштабирования входного сигнала используются операционные усилители. Для защиты от перенапряжений применяются диоды, транзисторы и резисторы в цепи входа, что предотвращает работу компонентов вне допустимых режимов [2].

Представлены результаты практической реализации метода на примере системы с четырьмя каналами параллельной оцифровки. Практическая реализация подтвердила эффективность метода, его способность повышать точность оцифровки, а также применимость и эффективность метода в реальных системах.

Литература

1. Косенко В.А., Савченко Ю.В. Актуальные проблемы при проектировании устройств сопряжения для информационно-управляющих систем // Наноиндустрия, 2024. — Т. 17. — № S10-1 (128). — С. 121–124. DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.10s.121.124. EDN XHKFTC.

2. Косенко В.А. Метод повышения точности аналого-цифрового преобразования сигналов без потери быстродействия // Электронные информационные системы, 2024. — № 2 (41). — С. 59–71. EDN FYYYYAC.
3. Косенко В.А. Разработка и моделирование способа разделения сигнала для многоканальной оцифровки // Электронные информационные системы, 2024. — № 3 (42).



УДК 004.35

Обработка импульсного сигнала фотоприемного устройства при помощи специализированной микросхемы

Казённов К. В., Якунин А. Н.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

kirill.kazyonnov@yandex.ru

Разработана специализированная микросхема для систем оптического наведения, осуществляющая обработку импульсного сигнала с фотоприемного устройства, проведено комплексное тестирование микросхемы на макете системы управления, на основе полученных результатов определены ее основные преимущества, недостатки, а также условия применимости данной микросхемы.

Ключевые слова: фотоприемное устройство; оптический сигнал; обработка импульсного сигнала; специализированная заказная микросхема.

Введение

Развитие оптоэлектронных систем, применяемых в различных областях промышленности, привело к повышению требований к скорости, точности и эффективности обработки импульсных сигналов с фотоприемных устройств. Несмотря на достигнутый прогресс, существует потребность в создании специализированной микросхемы, способной обеспечить более высокое качество обработки сигналов при меньших энергозатратах и габаритах. Исследование направлено на решение этой актуальной задачи путем разработки и тестирования новой микросхемы для обработки импульсных сигналов с фотоприемных устройств.

Тестирование специализированной микросхемы

В ходе работы была создана специализированная микросхема для обработки импульсных сигналов с фотоприемных устройств. Производство микросхемы полностью отечественное и не зависит от санкций и геополитической обстановки. Тестирование микросхемы проводилось в два этапа: на стендовом макете, а затем в составе системы управления, что позволило всесторонне оценить ее характеристики и функциональность. Результаты тестирования продемонстрировали, что разработанная микросхема обладает рядом преимуществ, в частности уменьшенными габаритами и меньшим энергопотреблением, в сравнении с вариантом реализации данного функционального узла на покупных дискретных элементах иностранного производства. Однако в ходе тестирования были выявлены и недостатки: ложное детектирование нарастания сигнала амплитудой до 50 мВ, взаимное влияние групп каналов микросхемы друг на друга, погрешность коэффициента усиления между каналами, что может приводить к искажению детектирования и обработки сигнала.

На основе полученных результатов были определены условия применимости разработанной микросхемы и намечены пути дальнейшего совершенствования ее характеристик путем разделения групп каналов между собой с помощью использования нескольких микросхем, уменьшения погрешности коэффициента усиления

каналов, а также переработки узла детектирования информационного сигнала. Данные изменения приведут к переработке микросхемы и выпуску второй ревизии.

Заключение

Результаты проведенного исследования демонстрируют перспективность разработанной микросхемы для обработки импульсных сигналов с фотоприемных устройств. Достигнутые улучшения в габаритах и энергопотреблении открывают новые возможности для создания компактных и энергоэффективных оптоэлектронных систем. Однако выявленные недостатки указывают на необходимость дальнейшей оптимизации. Будущие исследования будут направлены на устранение этих недостатков и расширение диапазона применимости микросхемы.

УДК 53.072.8

Разработка драйвера гибридного шагового двигателя с микроконтроллерным управлением

Чельшев Л. С.^{1,2}, Ануфриев А. Э.^{1,2}, д. т. н., Тимошенков С. П.²

¹ АО «Завод ПРОТОН»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 6

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

leonid.chelyshev@live.ru, spt111@mail.ru

Приведено общее описание работы шагового двигателя, проведен анализ драйверов для его управления. Описаны существующие изделия и их отличие от разрабатываемого. Рассчитана и создана принципиальная монтажная схема, создан прототип устройства, произведены первичные испытания работы драйвера шагового двигателя.

Ключевые слова: шаговый двигатель; микроконтроллер; управление электродвигателем; драйвер двигателя; драйвер шагового двигателя.

Шаговые двигатели — очень важная часть в функционировании различных устройств. Благодаря им стала возможна работа таких систем, как 3D-принтеры, станки с ЧПУ. Целью данной работы является получение знаний о создании и тестирование работы драйвера шагового двигателя с подключенным мотором NEMA 17.

Представленный в этой статье драйвер шагового двигателя основан на микроконтроллере STM32F103C8T6. Эта микросхема выполняет функцию преобразования управляющих сигналов станка в питание на заданном контакте питания шагового мотора. Программное обеспечение микроконтроллера позволяет задавать ширину управляющего импульса и тем самым управлять точностью и плавностью работы питаемого мотора. Разработка драйвера гибридного шагового двигателя прошла в САПР Delta Design 3.7.

В рамках разработки был создан драйвер, обладающий следующими характеристиками:

- напряжение питания драйвера — 12–20 В;
- интерфейсы управления драйвером — полнодуплексный SPI или UART;
- размеры драйвера (Д×Ш×В) — 35×30×12 мм;
- максимальный ток питания мотора — 1,9 А;
- количество контактов для подключения мотора — 4.

В ходе тестирования была подтверждена работоспособность драйвера: вал мотора поворачивался с шагом 1,8° (минимальный угол поворота за один шаг для данного мотора) под воздействием управляющего импульса.

Литература

1. Рентюк В. Шаговые двигатели и особенности их применения // Компоненты и технологии, 2013. — № 10.
2. Мартынов А. А. Электрический привод: Учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2013. — 426 с.: ил.

3. Алексеев К. Б., Палагута К. А. Микроконтроллерное управление электроприводом: Учебное пособие. — М.: МГИУ, 2008. — 298 с.
4. Контроллер шагового двигателя // Радиофанат. — URL: http://rfanat.qrz.ru/stanki_chpu/stat2.html (дата обращения: 17.01.2024).
5. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / Пер. с англ. — Изд. 2-е. — М.: БИНОМ, 2014. — 704 с., ил.
6. Емельянов А. В., Шилин А. Н. Шаговые двигатели: Учеб. пособие. — Волгоград: ВолгГТУ, 2005. — 48 с.



УДК 504.064.38

Архитектура системы мониторинга экологии водной среды

Тевяшов Г. К., Пашенко Р. А., Романова М. А.

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65

glebtevyashov96@yandex.ru, r.pashenko@mail.ru, maromanova@ipu.ru

В данной работе рассматривается архитектура системы мониторинга экологии водной среды, которая является сложной и многоуровневой и состоит из различных компонентов и подсистем. Для реализации такой системы необходимо провести ряд исследований и разработок, включая выбор подходящих датчиков и сенсоров, разработку алгоритмов обработки данных и создание программного обеспечения для управления системой. Важным аспектом является обеспечение безопасности данных от несанкционированного доступа и использования. Результаты исследования могут быть полезны для специалистов в области экологии, гидрологии, инженерии и других смежных областей, занимающихся вопросами мониторинга и сохранения водных ресурсов.

Ключевые слова: экология водной среды; архитектура системы мониторинга; экология водной среды; датчики и сенсоры; сбор данных; обработка данных; визуализация данных; анализ данных; принятие решений; управление системой; безопасность данных.

Система мониторинга экологии водной среды представляет собой комплекс технических и программных средств, предназначенных для сбора, обработки и анализа данных о состоянии водных ресурсов. Целью такой системы является обеспечение контроля за состоянием водных объектов, выявление возможных загрязнений и нарушений экологического равновесия.

Основными компонентами системы являются датчики и сенсоры, устройства сбора и обработки данных, программное обеспечение, базы данных и системы оповещения. Датчики и сенсоры собирают данные о физических, химических и биологических параметрах воды, а устройства сбора и обработки преобразуют эти сигналы в цифровые данные. Программное обеспечение обрабатывает полученные данные, анализирует их и предоставляет информацию пользователям. Базы данных хранят информацию о состоянии водных объектов, результатах измерений и анализа, а системы оповещения уведомляют пользователей о возможных нарушениях или изменениях в состоянии окружающей среды.

Работа системы основана на непрерывном сборе данных с помощью датчиков и сенсоров, обработке данных с использованием алгоритмов и методов анализа, визуализации результатов в виде графиков, диаграмм и карт, а также автоматическом оповещении о критических значениях параметров. Система может быть интегрирована с существующими системами мониторинга окружающей среды для обмена данными и расширения функциональности, а также с системами управления водными ресурсами для оптимизации использования и охраны водных объектов.

Важными аспектами архитектуры системы являются масштабируемость и гибкость, позволяющие добавлять новые датчики и расширять функциональность, а также безопасность и надежность, обеспечивающие защиту данных от несанкционированного доступа и предотвращение сбоев и потери данных. Управление

и администрирование системы включают механизмы управления доступом к данным и функциям системы, а также административные инструменты для настройки и обновления системы. Тестирование и оптимизация системы направлены на выявление возможных проблем и ошибок, а также повышение эффективности и производительности работы системы.

Архитектура системы мониторинга экологии водной среды является сложной и состоит из различных компонентов и подсистем, которые взаимодействуют между собой для обеспечения эффективного мониторинга и анализа состояния водных ресурсов.

1. Цели и задачи системы:

- 1.1) обеспечение контроля за состоянием водных ресурсов, выявление возможных загрязнений и нарушений экологического равновесия;
- 1.2) сбор данных о качестве воды, уровне загрязнения, состоянии флоры и фауны водоемов;
- 1.3) предоставление информации для принятия управленческих решений по охране окружающей среды.

2. Компоненты системы:

- 2.1) датчики и сенсоры — устройства, которые собирают данные о физических, химических и биологических параметрах воды;
- 2.2) устройства сбора и обработки данных — оборудование, которое принимает сигналы от датчиков и преобразует их в цифровые данные;
- 2.3) программное обеспечение — алгоритмы и программы, которые обрабатывают полученные данные, анализируют их и предоставляют информацию пользователям;
- 2.4) базы данных — хранилища информации о состоянии водных объектов, результатах измерений и анализа;
- 2.5) системы оповещения — механизмы, которые уведомляют пользователей о возможных нарушениях или изменениях в состоянии окружающей среды.

3. Основные принципы работы:

- 3.1) непрерывный сбор данных с помощью датчиков и сенсоров;
- 3.2) обработка данных с использованием алгоритмов и методов анализа;
- 3.3) визуализация результатов в виде графиков, диаграмм и карт;
- 3.4) автоматическое оповещение о критических значениях параметров.

4. Интеграция с другими системами:

- 4.1) возможность интеграции с существующими системами мониторинга окружающей среды для обмена данными и расширения функциональности;
- 4.2) интеграция с системами управления водными ресурсами для оптимизации использования и охраны водных объектов.

5. Масштабируемость и гибкость:

- 5.1) Архитектура системы должна быть масштабируемой, чтобы можно было добавлять новые датчики и расширять функциональность;
- 5.2) гибкость системы позволяет адаптировать ее под конкретные потребности и условия эксплуатации.

6. Безопасность и надежность:

- 6.1) защита данных от несанкционированного доступа и обеспечение конфиденциальности информации;



- 6.2) надежная работа оборудования и программного обеспечения для предотвращения сбоев и потери данных.
7. Управление и администрирование системой:
 - 7.1) наличие механизмов управления доступом к данным и функциям системы;
 - 7.2) административные инструменты для настройки и обновления системы.
8. Тестирование и оптимизация:
 - 8.1) проведение тестирования системы на различных уровнях для выявления возможных проблем и ошибок;
 - 8.2) оптимизация работы системы для повышения эффективности и производительности.
9. Перспективы развития:
 - 9.1) расширение функциональности системы путем добавления новых датчиков, алгоритмов анализа.

Архитектура системы мониторинга экологии водной среды представляет собой сложную и многоуровневую систему, состоящую из различных компонентов и подсистем. Она позволяет эффективно отслеживать состояние водных ресурсов и принимать своевременные меры по их защите и восстановлению.

Основные компоненты системы включают в себя датчики и сенсоры для сбора данных о состоянии водной среды, каналы связи для передачи этих данных на серверы или облачные платформы, программное обеспечение для управления системой и анализа данных, а также интеграцию с другими информационными системами.

Для реализации такой системы необходимо провести ряд исследований, включая выбор подходящих датчиков и сенсоров, разработку алгоритмов обработки данных и создание программного обеспечения для управления системой.

Важным аспектом является обеспечение безопасности данных от несанкционированного доступа и использования.

В целом архитектура системы мониторинга может варьироваться в зависимости от конкретных требований и условий эксплуатации. Например, в некоторых случаях может потребоваться более высокая точность измерений или более широкий спектр параметров для мониторинга.

Таким образом, система мониторинга экологии водной среды является важным инструментом для обеспечения устойчивого развития и сохранения водных ресурсов.

Литература

1. Тевяшов Г. К., Пашенко Р. А., Баранова Ю. А. Разработка системы мониторинга параметров воды для аквакультуры // Датчики и системы, 2024. — № 2 (274). — С. 33–39. DOI: 10.25728/datsys.2024.2.6. EDN MKRGHF.
2. Иванов А. Р. Физико-химические методы анализа в экологическом мониторинге воды и почвы: Учебное пособие. — Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. — Ч. 1. — 77 с.
3. Ниязгулов У. Д., Цховребов Э. С., Юрьев К. В. Методы мониторинга водных экологических систем и биоресурсов // Вестник Тувинского государственного университета. Естественные и сельскохозяйственные науки, 2014. — № 2.

УДК 004.312.44

Оптимизация набора логических элементов для реализации систем функций в ПЛИС FPGA

Советов С. И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, г. Пермь, ул. Комсомольский просп., 29
fizkoz@gmail.com

Решается задача выбора оптимального набора элементов LUT (lookup table) программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа FPGA (field-programmable gate array). Получен оптимальный вариант по площади кристалла (количество транзисторов в частном случае) и потребляемой мощности, то есть определение количества элементов заданного типа.

Ключевые слова: ПЛИС FPGA; LUT; передающие транзисторы; таблица истинности; логическая функция.

В современных ПЛИС FPGA для реализации систем логических функций используются логические элементы типа «таблицы истинности» LUT. LUT представляет собой дерево передающих транзисторов, которое реализует только одну логическую функцию. Предложена модифицированная структура LUT, реализующая несколько логических функций одновременно (многофункциональный элемент МФЭ) [1, 2] при реализации систем логических функций от одних и тех же переменных. Получен метод синтеза МФЭ, оценки сложности по количеству транзисторов, занимаемой площади кристалла, задержки и потребляемой мощности. При этом дано количество функций, ограничения по временной задержке. Предполагается, что имеются разные элементы, в том числе предложенные ранее многофункциональные (МЛЭ), заданных типов и в заданном количестве. Как вариант МЛЭ конфигурируются в адаптивных логических модулях (АЛМ). При использовании МФЭ для реализации систем функций от одних и тех же аргументов уменьшается площадь кристалла и количество используемых транзисторов, но увеличивается временная задержка, а также в ряде случаев и потребляемая мощность. Поэтому в статье рассматривается многокритериальная оптимизационная задача с ограничениями для выбора оптимального набора обычных и/или МФЭ для реализации заданной системы логических функций заданного количества переменных в совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ), реализующих несколько логических функций. Приведен пример получения минимального по площади кристалла и потребляемой мощности набора элементов при превышении заданных ограничений по временной задержке.

Литература

1. Советов С. И., Тюрин С. Ф. Метод синтеза логического элемента, реализующего несколько функций одновременно // Russ. Technol. J., 2023. № 11 (3). P. 46–55.
2. Тюрин С. Ф., Васенин И. А., Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Советов С. И. Программируемое логическое устройство: Патент на изобретение. RU 2811404 С1. — 11.01.2024. — Заявка от 02.08.2023.



3. Jalel Ktari, Tarek Frikha, Tarek Frikha, Monia Hamdi, Habib Hamam. Enhancing Blockchain Security and Efficiency through FPGA-Based Consensus Mechanisms and Post-Quantum Cryptography. May 2024. DOI: 10.2174/0123520965288815240424054 237.
4. He Li, Yongming, Tang Zhiqiang, Que Jiliang, Zhang Jiliang Zhang. FPGA Accelerated Post-Quantum Cryptography. January 2022 IEEE Transactions on Nanotechnology PP(99):1-7. DOI: 10.1109/TNANO.2022.3217802.
5. Maksim Levental. Tensor Networks for Simulating Quantum Circuits on FPGAs. August 2021. [Electronic resource] — Access mode: https://www.researchgate.net/publication/353941749_Tensor_Networks_for_Simulating_Quantum_Circuits_on_FPGAs.
6. Hemin Rahimi. Optimum implementation of digital logic circuits on 3D FPGAs. Thesis for: MasterAdvisor: Dr. Hadi jahanirad November 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.24347.85283.
7. Tyurin S. F. and Vikhorev R. V. A Decoder — Look up Tables for FPGAs // IJC, 2021. Vol. 20. № 3. P. 365–373. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.20.3.2282>.
8. Vikhorev R. Universal logic cells to implement systems functions // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE, 2016. P. 404–406. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448197.
9. Vikhorev R. Improved FPGA logic elements and their simulation // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE, 2018. P. 275–280. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317080.
10. Skornyakova A. Yu., Vikhorev R. V. Self-Timed LUT Layout Simulation // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE, 2020. P. 176–179. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039374.
11. Monther Abusultan, Sunil P. Khatri. A comparison of FinFET based FPGA LUT. Texas A&M University, College Station, TX, USA. Published in ACM Great Lakes Symposium on VLSI 2014. DOI: 10.1145/2591513.2591596.
12. Строгонов А. Проектирование конечных автоматов в приложении STATEFLOW системы MATLAB / SIMULINK с последующей реализацией в базе ПЛИС // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2023. — № 3 (224). — С. 134–147.
13. Berezin N. M., Chernetskaya I. E., Panishchev V. S., Shabarov A. M. Development of a device for multiplying numbers by means of FPGA. Published under licence by IOP Publishing Ltd. // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2142. XI International Conference on High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production (HPCST 2021) 21–22 May 2021, Barnaul, Russia. DOI: 10.1088/1742-6596/2142/1/012001.
14. Пирогов А. А., Пирогова Ю. А., Башкиров А. В., Чепелев М. Ю., Жилин Б. И. Методика проектирования преобразователя кода Грея на ПЛИС // Вестник Воронежского института ФСИИ России, 2020. — № 3. — С. 9–14.
15. Строгонов А., Кривчун М., Городков П. Обзор программных средств с открытым исходным кодом для исследования современных архитектур ПЛИС XILINX // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2020. — № 1 (192). — С. 100–107.

УДК 621.3

Современное состояние и перспективы развития изделий пьезотехники**Лазарев Д. В.***АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»**644071, г. Омск, ул. Масленникова, 231**107@oniir.ru*

Рассмотрено современное состояние в области создания пьезоэлектрических резонаторов, генераторов и фильтров у нас в стране и за рубежом. Приведены достигнутые в настоящее время показатели и дан прогноз перспектив дальнейшего развития изделий пьезотехники.

Ключевые слова: пьезоэлектрик; кварц; резонатор; генератор; фильтр; частота.

Изделия пьезотехники, такие как резонаторы, генераторы и фильтры, находят широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре и будут востребованы в обозримой перспективе. Эти устройства в значительной степени определяют архитектуру построения и основные тактико-технические характеристики современных и перспективных систем и комплексов радиолокации, радионавигации, всех видов связи, радиоэлектронной разведки и радиоэлектронного противодействия, систем управления и др.

Кроме того, резонаторы, генераторы и фильтры, неся в себе информацию о частотах радиобмена, являются крайне критическими элементами. Поэтому развитию пьезотехники в промышленно развитых странах уделяется большое внимание, что подтверждается проведением новых НИОКР ведущими зарубежными и отечественными предприятиями, а также ежегодным увеличением номенклатуры выпускаемых ими изделий.

В настоящей работе рассмотрены основные виды пьезоэлектрических резонаторов, а также генераторов и фильтров, выполненных как на объемных акустических волнах на основе кристаллических и пленочных пьезоэлементов (FBAR), так и на структурах на поверхностных акустических волнах (SAW). Приведены основные электрические и массогабаритные параметры пьезоэлектрических резонаторов, генераторов и фильтров, достигнутые в настоящее время отечественными и зарубежными предприятиями. Представлена оценка современного уровня, достигнутого в области создания изделий пьезотехники у нас в стране и за рубежом.

Проведен анализ мировых тенденций развития изделий пьезотехники. Отражены основные тренды дальнейшего улучшения основных параметров пьезоэлектрических резонаторов, генераторов и фильтров, прежде всего таких, как диапазон рабочих частот, добротность, стабильность, избирательность, габаритные размеры и т. д., за счет применения новых материалов и использования конструкторско-технологических решений. На основе проведенного анализа дан прогноз перспектив развития изделий пьезотехники.

Литература

1. Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Доберштейн С. А., Синицина Т. В. Техника ПАВ: ближайшие перспективы // Техника радиосвязи, 2017. — Вып. 3 (34). — С. 72–84.



2. Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Доберштейн С. А., Синицина Т. В. Технология поверхностных волн: ближайшие перспективы // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXII Межд. науч. конф. Сборник статей. — СПб.: ГУАП, 2019. — Ч. 2. — С. 77–85.
3. URL: <http://www.meteor.su>.
4. URL: <http://www.lit-phonon.ru>.
5. URL: <http://www.morion.com.ru>.
6. URL: <http://www.oaopiezo.com>.
7. URL: <http://www.piezotron.ru>.
8. URL: <http://mxtal.ru>.
9. URL: <http://butis-m.ru>.
10. URL: <http://www.ad-rf.com>.
11. URL: <http://www.abracon.com>.
12. URL: <http://www.gyer-electronic.de>.
13. URL: <http://www.golledge.com>.
14. URL: <http://www.rakon.com>.
15. URL: <http://www.yauch.com>.
16. URL: <http://www.ndk.com>.
17. URL: <http://www.sjk-crystal.com>.
18. URL: <http://www.euroquartz.co.uk>.
19. URL: <http://www.sitime.com>.
20. URL: <http://www.taisaw.com>.
21. URL: <http://www.qorvo.com>.

УДК 621.793.162

Конфигурирование технологической линии CVD для осаждения диэлектрических слоев в передовых КМОП-технологиях

Гулянов М. В.¹, Патюков С. И.²¹ ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4,4а

² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Производство СБИС КМОП с проектными нормами 45 нм и менее предъявляет особые требования к специальному технологическому оборудованию осаждения тонких пленок (CVD). В условиях санкционного давления, доступность необходимого CVD оборудования ограничена. В процессе анализа ассортимента вторичного рынка установлено, что некоторые виды критически важного оборудования недоступны. В данной работе предлагается оптимизированная технологическая линия CVD, основанная на доступных компонентах и обеспечивающая производство КМОП по проектным нормам до 28 нм.

Ключевые слова: СБИС КМОП; CVD; микроэлектроника; ХОГФ; специальное технологическое оборудование; технологическая линия.

Типичный КМОП техпроцесс уровня 130 нм включает 10–20 типов диэлектрических и металлических функциональных слоев (ФС). По мере перехода к более тонким техпроцессам КМОП СБИС увеличивалось количество формируемых ФС. Изменялся тип применяемых материалов функциональных слоев и методы их синтеза, например [1, 2]:

- для изготовления мелко-щелевой изоляции (shallow trench isolation, STI) в техпроцессах КМОП от 130 до 28 нм применяется оксид кремния. С развитием технологии изменился метод синтеза STI оксида: для технологий от 130 до 65 нм осаждение STI выполняется в высокоплотной плазме (HDP CVD), в то время как с 45 до 28 нм оксид синтезируют методом субатмосферного осаждения (SACVD), которое обеспечивает более конформное заполнение канавки (щели), и меньшую величину механических напряжений в слое оксида, чем HDP CVD [3, 4]. При этом, для техпроцессов КМОП от 90 до 65 нм допустимо применение как HDP CVD, так и SACVD [6];
- подзатворный диэлектрик, входящий в состав затворной структуры (Gate Stack), в технологиях КМОП от 130 до 45 нм выращивался в диффузионных печах. Для КМОП 130 нм применялся нелегированный оксид кремния, а в техпроцессах 90 нм и 65 нм применялся оксинитрид кремния. В техпроцессе КМОП 45 нм изменился как тип диэлектрика, так и способ его синтеза: применяется оксид гафния, полученный методом атомно-слоевого осаждения.

Как видно из приведенных выше примеров, при переходе к более тонким процессам СБИС КМОП в некоторых ключевых блоках технологии не меняется материал функционального слоя, но меняется способ его синтеза. В других блоках может кардинально поменяться как материал, так и способ его синтеза.

В настоящее время приобретение специального технологического оборудования (СТО) у официальных поставщиков стало не возможным. Авторы провели анализ требований к операциям передовых СБИС КМОП-технологий и вторичного рынка СТО и, исходя из результатов этого анализа, разработали технологическую линию, учитывающую как требования к техпроцессу СБИС КМОП, так и ассортимент доступного на вторичном рынке СТО. В данном докладе представлен участок газофазного осаждения данной линии. Предложенная линия содержит:

- для блока мелко-шеллевой изоляции (STI): высококонформное осаждение оксида кремния по схеме осаждение-травление-осаждение с последующим высокотемпературным отжигом для уплотнения оксида [7, 8];
- в блоке предметалльной изоляции (PMD) для СБИС КМОП до 65 нм применено субатмосферное осаждение легированного оксида кремния. Для СБИС КМОП от 45 нм и меньше, ввиду ограничения термобюджета [10, 11], предлагается высококонформное осаждение оксида кремния с добавлением паров воды, обеспечивающее синтез оксида с высокой плотностью [4, 5];
- в блоке контактов (CA) предлагается применить осаждение вольфрама с использованием диборана (B₂H₆) как восстановителя и атомно-слоевое осаждение нуклеационного слоя. Для техпроцессов СБИС КМОП 28 нм и менее предусмотрено применение схемы осаждение-травление-осаждение [12].

Литература

1. International Technology Roadmap for Semiconductors, Front End Processes, 2001.
2. International Technology Roadmap for Semiconductors, Interconnect, 2001–2011.
3. Arghavani R. et al. Stress Management in Sub-90-nm Transistor Architecture, 2004. DOI: 10.1109/ted.2004.835993.
4. Tilke A. T. et al. Shallow Trench Isolation for the 45-nm CMOS Node and Geometry Dependence of STI Stress on CMOS Device Performance // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2007. № 20 (2). P. 59–67. DOI: 10.1109/tsm.2007.896632.
5. Liu H. et al. PMD and STI Gap-Fill Challenges for Advanced Technology of Logic and eNVM // ECS Transactions, 2013. 52(1), 397–402. DOI: 10.1149/05201.0397ecst.
6. Hu C.-Y., Chen J. F. et al. Shallow trench isolation stress modification by optimal shallow trench isolation process for sub-65-nm low power complementary metal oxide semiconductor technology // Journal of Vacuum Science & Technology B, 2010. 28(2), 391–397. DOI: 10.1116/1.3359612.
7. Chen J. et al. Evolution of STI Gap Fill Technology, 2011. DOI: 10.1149/1.3567623.
8. Tavernier A. Innovative Gap-fill Strategy For 28 nm Shallow Trench Isolation, 2012.
9. Патент Applied Materials WO 2005/071740 A2, 04.08.2005.
10. Lindroos J. et al. Nickel: A very fast diffuser in silicon // Journal of Applied Physics, 2013. 113(20), 204906. DOI: 10.1063/1.4807799.
11. Berning G. L. P., Levenson L. L. Diffusion of nickel in silicon below 475 °C // Thin Solid Films, 1978. 55(3), 473–482. DOI: 10.1016/0040-6090(78)90164-5.
12. Xu Jianhua et al. An optimized W process for metal gate electrode gap filling application // China Semiconductor Technology International Conference. IEEE, 2015.

УДК 621.382

Альтернативные high-k и low-k-диэлектрики для приложений микроэлектроникиРезванов А. А.^{1,2}, Зюзин С. С.^{1,2}, Ганыкина Е. А.^{1,2}, Гвоздев В. А.^{1,2},
Горохов С. А.^{1,2}, Резник А. А.^{1,2}, Цепкин М. В.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
arezvanov@niime.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В настоящей работе будут рассмотрены перспективные low-k- и high-k-диэлектрики, которые могут быть использованы на разных технологических узлах при создании интегральных схем (ИС): на этапе металлизации, диффузионные барьеры, подзатворный диэлектрик, энергонезависимая память.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение; low-k-диэлектрики; high-k-диэлектрики; прекурсоры; металлизация; энергонезависимая память.

Превосходные диэлектрические свойства диоксида кремния (SiO_2) способствовали развитию микроэлектроники за последние 40 лет. Диоксид кремния имеет низкую плотность дефектов и обеспечивает термодинамически стабильный интерфейс. SiO_2 характеризуется высоким удельным сопротивлением, превосходной диэлектрической прочностью и большой шириной запрещенной зоны. Пленки SiO_2 , полученные либо путем термического окисления кремния, либо путем осаждения, успешно использовались как для затворов, так и для межсоединений в устройствах интегральных схем (ИС) [1]. Однако в постоянном стремлении к повышению производительности интегральных схем за счет уменьшения размеров элементов схемы размеры МОП-транзисторов (полевых транзисторов металл-оксид-кремний) и других устройств масштабировались в соответствии с законом Мура. Начиная с определенной технологии, это приводит к противоположным требованиям к свойствам подзатворного диэлектрика и межслойных слоев. Диэлектрические пленки для транзисторной структуры должны иметь более высокую диэлектрическую проницаемость (high-k-диэлектрики), в то время как диэлектрические материалы межсоединений должны иметь более низкую диэлектрическую проницаемость по сравнению с SiO_2 (low-k-диэлектрики).

Для поддержания высокого тока возбуждения и емкости затвора, требуемых для масштабированных МОП-транзисторов, толщина затворных диэлектриков SiO_2 уменьшилась с сотен нанометров до менее 2 нм. Однако слои SiO_2 тоньше 1,2 нм не обладают изолирующими свойствами, требуемыми для диэлектрика затвора. Использование сверхтонких диэлектриков SiO_2 приводит к ряду проблем, включая высокий ток утечки затвора, уменьшенный ток возбуждения, плохую устойчивость к диффузии примесей и снижение надежности. Поэтому требуются альтернативные материалы с малой «эквивалентной толщиной оксида», которая зависит от диэлектрической проницаемости. Другим перспективным применением high-k-диэлектриков является энергонезависимая память, а именно — резистивная память (ReRAM) и сегнетоэлектрическая (FeRAM) [2]. Преимущества данных



типов памяти заключаются в низкой энергии перезаписи, высокой масштабируемостью, а также большим количеством циклов переключений без деградации функциональных свойств при толщине слоя ~ 10 нм. В качестве основного метода формирования подобного рода диэлектриков является атомно-слоевое осаждение, которое активно развивается и находит широкое применение на этапе создания ИС [3].

В случае диэлектрических материалов для межсоединений требования противоположны. Современные ИС содержат 10^8 – 10^9 транзисторов на площади менее 1 см^2 . По мере уменьшения размеров скорость переключения транзистора увеличивается, что является следствием уменьшения времени прохождения носителя через меньшую длину канала. Транзисторы должны быть соединены между собой, чтобы ИС была функциональной. По мере увеличения функциональной сложности устройств количество уровней межсоединений и общая длина металлических межсоединений продолжают увеличиваться до 8–10 уровней металлических линий. Именно здесь становятся важными характеристики сопротивления R и емкости C материалов межсоединений. Фактически, быстрое увеличение времени задержки RC является одним из основных узких мест для суб-100 нм проектных норм [4].

В первой части данной работе рассмотрены основные аспекты формирования тонких слоев high- k -диэлектриков — HfO_2 , ZrO_2 , TiO_2 с использованием ТЕМАН, ТЕМАZ и TDMAT соответственно. Указанные пленки были осаждены с использованием отечественной установки «Изофаз 200 ТМ-01». В работе рассматриваются разные методы формирования — плазменный и термический АСО. Исследованы свойства пленок, а также проведена их апробация в качестве функционального слоя для энергонезависимой памяти.

Во второй части работы проведено исследование перспективных гибридных органосиликатных пористых пленок с метильными терминальными ($\text{Si}-\text{CH}_3$) и бензольными мостиковыми группами. Подобный класс диэлектриков демонстрирует существенный рост механической прочности (модуль Юнга) при определенной концентрации бензольных групп при незначительном росте итоговой диэлектрической проницаемости. Проведено моделирование указанной структуры из первых принципов в среде Quantum Espresso, по результатам которого определены характеристики матрицы исследуемого материала.

*Исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 23-91-06002, <https://rscf.ru/project/23-91-06002>.*

Литература

1. Красников Г. Я. и др. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. № 4 (177). С. 60–64.
2. Zahoor F. et al. Resistive random access memory: introduction to device mechanism, materials and application to neuromorphic computing // Discover Nano, 2023. Vol. 18. № 1. P. 36.
3. Зюзин С. С. и др. Атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида гафния с использованием установки «Изофаз ТМ 200-01» // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8-2. — С. 548–552.
4. Rezvanov A. et al. Benzene bridged hybrid organosilicate films with improved stiffness and small pore size // Mat. Chem. and Phys., 2022. Vol. 230. P. 126571.

УДК 621.7.01

Полностью самовыравнивающиеся переходные отверстия с применением метода зонально-селективного атомно-слоевого осаждения

Симонов А. В.*ООО «Остек-ЭК»**121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2**simonov.a@ostec-group.ru*

Рассмотрена проблема выравнивания и совмещения переходных отверстий и линий при формировании межслойных металлических соединений на конечных этапах производства. Показаны варианты решения данной проблемы с применением зонально-селективного атомно-слоевого осаждения.

Ключевые слова: полностью самовыравнивающиеся переходные отверстия; ПСПО; зонально-селективное атомно-слоевое осаждение; АСО.

С уменьшением проектных норм производства одним из критично важных вопросов становится выравнивание и совмещение отверстий и линий при формировании межслойных металлических соединений на конечных этапах производства.

Появление краевого смещения при формировании межслойных соединений имеет ряд негативных последствий для производительности, надежности и долговечности конечного устройства:

- если межслойное отверстие из-за смещения располагается слишком близко к следующей металлической линии, со временем может возникнуть короткое замыкание;
- возможны локальные области перетрава при вскрытии контактных окон, которые далее будут заполнены металлом, что уменьшит расстояние до следующей металлической линии;
- близость к соседней металлической линии приводит к увеличению емкости между соединением отверстиями и линиями;
- краевое смещение также уменьшает площадь контакта между металлами слоев N и $N-1$, тем самым увеличивая контактное сопротивление;
- более высокая емкость и более высокое сопротивление в совокупности приводят к увеличению RC-задержки;
- уменьшенная площадь контакта структур и смещение также снижают надежность за счет повышения риска электромиграции в межслойном диэлектрике, что также может привести к возможному выходу конечного устройства из строя.

Вышеперечисленные последствия краевого смещения при производстве межсоединений ограничивают дальнейшее уменьшение размеров полупроводниковых устройств.

Возможным решением данного вопроса может быть применение полностью самовыравнивающихся переходных отверстий (ПСПО) при помощи углублений в металлических линиях или формировании дополнительного диэлектрического зазора методом зонально-селективного атомно-слоевого осаждения (АСО).



Схема, основанная на травлении углублений в металлических слоях, требует специального процесса травления для создания рельефа. Однако травление слоя Si является сложной задачей. При использовании жидкостного химического травления трудно прецизионно контролировать глубину травления. Кроме того, травление Si приводит к образованию относительно шероховатой поверхности.

Применение метода формирования ПСПО при помощи зонально-селективного АСО создает рельеф, эквивалентный рельефу, получаемому с помощью травления углублений в слоях Si, но обладает лучшим контролем толщины барьера, при этом отсутствует шероховатость металлического слоя, возникающая при жидкостном травлении. В случае формирования ПСПО необходим процесс АСО, который приводит к осаждению только на межслойный диэлектрик без осаждения на металлические области. Также селективный по площади АСО позволяет осадить дополнительный диэлектрический барьер, состоящий из материала, отличного от оксида, который используется в качестве стандартного межслойного диэлектрика, что полезно для предотвращения образования дефектов перетрава в случае использования специального стека, состоящего из low-k-диэлектрика и стоп-слоя.

Рассмотрены вопросы осаждения на различные материалы, а также вопрос защиты металлических областей, которые не должны быть подвержены росту. Особо важным моментом является подготовка и состояние поверхности, сильно влияющие на процесс зонально-селективного АСО.

Литература

1. Mackus A. J. M., Merckx M. J. M. Fully Self-Aligned Vias: The Killer Application for Area-Selective ALD? — A Discussion of the Requirements for Implementation in High Volume Manufacturing, 2019, 7. AtomicLimits.
2. Pasquali M., De Gendt S., Armini S., Illiberi A., Verni G., Deng S., Givens M. Dielectric on dielectric area-selective deposition by a combination of atomic layer deposition and organic film passivation for self-aligned via patterning // Area Selective Deposition Workshop Conference, 2019
3. Altamirano-Sanchez E., Chan B. T., Delabie A., Armini S., Scheer S. (IMEC). Area Selective Deposition Challenges and Opportunities for Patterning Solution // Area Selective Deposition Workshop Conference, 2019.

УДК 621.3

Цифровая модель процесса ICP-CVD на молекулярном уровне: от активно обучаемых потенциалов к объяснению низкой воспроизводимости эксперимента**Гарифуллин К. З.^{1,2}, Мезенцев И. А.^{3,4}, Лосев Т. В.^{3,4}, Баширов И. И.^{3,4}, Салимов Р. Г.³, Кликушин А. С.³, Подрябинкин Е. В.¹, Малышев В. И.^{3,4}, Чалый В. А.^{3,4}, Новиков И. С.^{1,2}, Шапеев А. В.¹, Медведев М. Г.^{3,4}**¹ Сколковский институт науки и технологий

121205, г. Москва, Большой бульвар, 30/1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН

119334, г. Москва, Ленинский просп., 47

⁴ Центр НТИ, МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1

Построена модель осаждения аморфного нитрида бора методом ICP-CVD, использующая активно обучаемый межатомный потенциал MLIP. Установлено, что морфология пленок определяется тем, какие частицы попадают на подложку из плазмы, что позволило объяснить расхождение между экспериментами. Разработаны основы для компьютерного моделирования технологических процессов нанесения тонких пленок в микроэлектронике.

Ключевые слова: ICP-CVD; MLIP; нитрид бора; микроэлектроника.

Микро- и нанoeлектроника следующего поколения требует разработки новых термически и механически стабильных материалов с относительной диэлектрической проницаемостью (k), максимально приближенной к 1,0. В июне 2020 года Хонг и др. [1] представили аморфный нитрид бора, осажденный методом ICP-CVD (a -BN) с очень низким значением k , равным 1,78. Полученная им пленка a -BN толщиной 3 нм также оказалась термически, химически, механически и электрически стабильной, что удовлетворяет всем требованиям для практического применения данного материала. Два года спустя Лин и др. [2] провели, казалось бы, идентичный синтез, но получили пленку материала с качественно худшими свойствами. Когда условия синтеза были идентичны (на основании информации, приведенной в статьях) условиям эксперимента Хонга, соотношение бора и азота (B:N) составляло ~2,64, тогда как соотношение B:N в пленках, полученных в статье Хонга, было около 1,0. Чтобы получить такое же соотношение B:N, команде Лина пришлось специально добавлять азот в поток газа. Чтобы понять, почему, казалось бы, идентичные условия приводят к получению разных материалов, мы реконструировали и смоделировали данный процесс на атомарном уровне. В нашем моделировании мы использовали активно обучаемый межатомный потенциал MLIP [3]. Построенная нами модель процесса позволила установить, что морфология пленок определяется тем, какие частицы попадают на подложку из плазмы. Таким образом, нами было объяснено расхождение между экспериментами Хонга и Лина, и разработаны

основы для компьютерного моделирования технологических процессов нанесения тонких пленок в микроэлектронике.

Литература

1. Hong S., Lee C. S., Lee M. H., Lee Y., Ma K. Y., Kim G., Yoon S. I., Ihm K., Kim K. J., Shin T. J., Kim S. W., Jeon E., Jeon H., Kim J. Y., Lee H. I., Lee Z., Antidormi A., Roche S., Chhowalla M., Shin H. J., Shin H. S. Ultralow-dielectric-constant amorphous boron nitride // *Nature*, 2020. Vol. 582. № 7813. P. 511–514.
2. Lin C. M., Hsu C. H., Huang W. Y., Astié V., Cheng P. H., Lin Y. M., Hu W. S., Chen S. H., Lin H. Y., Li M. Y., Magyari-Kope B., Yang C. M., Decams J. M., Lee T. L., Gui D., Wang H., Woon W. Y., Lin P., Wu J., Lee J. J., Liao S. S., Cao M. Ultralow-k Amorphous Boron Nitride Based on Hexagonal Ring Stacking Framework for 300 nm Silicon Technology Platform // *Advanced Materials Technologies*, 2022. Vol. 7. № 10. P. 2200022.
3. Podryabinkin E. V., Shapeev A. V. Active learning of linearly parametrized interatomic potentials // *Computational Materials Science*, 2017. Vol. 140. P. 171–180.

УДК 67.02

Оценка влияния межоперационного времени простоя фоторезиста при выполнении операций проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете

Шелкунов Д. Ю.*ООО «НМ-Тех»**124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4,4а
Shelkunov@nm-tech.org*

В данной работе было оценено влияние взаимодействия молекулярных загрязнений в атмосфере чистых производственных помещений класса ИСО 6 в зависимости от времени между основными этапами формирования фоторезистивной маски.

Ключевые слова: фотолитография; химически усиленные фоторезисты; межоперационное время; глубокий ультрафиолет; молекулярные загрязнения.

В производстве полупроводниковой микроэлектроники используют в основном позитивные фоторезисты — области, облученные актиническим излучением, становятся растворимыми в агрессивной среде проявителя. Для обеспечения необходимой чувствительности к малым дозам экспонирования и проработки структур в фоточувствительном материале были разработаны и внедрены фоторезисты с химическим усилением. В воздушном пространстве чистых производственных помещений, не смотря на их тщательную очистку воздушными фильтрами, обеспечивающие класс чистоты ИСО 6, присутствуют молекулярные соединения, ухудшающие чувствительность фоторезистов, вступая в реакцию со сгенерированной фотокислотой или ее генераторами, входящими в состав химически усиленного фоторезиста.

Для исследования влияния загрязнений в среде производственного помещения проводилась инженерная обработка пластин с задержкой на охлаждающих плитах между этапами нанесения и экспонирования, экспонирования и термической обработкой после экспонирования, термической обработкой после экспонирования и проявлением рисунка в фоторезисте.

Анализ полученных результатов исследований позволил сделать заключение о том, что: качество структур не изменяется или слабо меняется (отклонение до 15%) в зависимости от времени простоя пластины между операциями. Воздушных фильтров для обеспечения чистоты атмосферы по классу ИСО 6 достаточно чтобы поддерживать концентрацию молекулярных загрязнений в границах, при которых не выявлено или выявлено слабое влияние на состав фоточувствительного материала и результат при контроле критических размеров формируемых структур.

Литература

1. Крутько Э. Т., Журавлева М. В., Мартинкевич А. А., Прокопчук Н. Р. Использование полиимидов в процессе фотолитографии // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология, 2016. — № 4 (186). — С. 59–66.
2. Mack C. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication // John Wiley & Sons, 2008. P. 244.

3. ГОСТ Р ИСО 14644-2-2020. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 2. Текущий контроль для подтверждения постоянного соответствия чистоты воздуха по концентрации частиц. — М.: Стандартинформ, 2020. — С. 2–4.
4. Okoroanyanwu U. *Chemistry and Lithography*. Wiley, 2011. P. 537.

УДК 621.382.3

Оптимизация гетероструктур, изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs и InP диаметром до 150 мм: рНЕМТ, ДрНЕМТ, НВТ и монолитно-интегрированные рНЕМТ/НВТ

Гладышев А. Г.¹, к. ф.-м. н., Егоров А. Ю.¹, д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН,
Панасенко П. В.², д. т. н., Дорофеев А. А.²

¹ ООО «Коннектор Оптикс»

194292, г. Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16, лит. Б
info@connector-optics.com

² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Представлены результаты разработки конструкции, технологии изготовления методом молекулярно-пучковой эпитаксии и приборной апробации гетероструктур InGaAlAsP на подложках GaAs и InP, диаметром до 150 мм. Гетероструктуры предназначены для производства СВЧ-транзисторов и СВЧ МИС см- и мм-диапазонов длин волн.

Ключевые слова: МПЭ; СВЧ-транзистор; гетероструктура.

Актуальность разработки гетероструктур InGaAlAsP на подложках GaAs и InP и оптимизации их параметров обусловлена растущим производством электронных компонентов в России, а также общемировым трендом перехода на пластины большей площади для наращивания объема производства и снижения себестоимости СВЧ-транзисторов и СВЧ МИС [1]. Несмотря на то, что гетероструктуры нитрида галлия, благодаря уникальному сочетанию электро-физических характеристик, находят все более широкое применение в твердотельной электронике, гетероструктуры на основе GaAs и InP по-прежнему играют важную роль для СВЧ микроэлектроники.

В представленной работе рассмотрены разработанные гетероструктуры на подложках GaAs диаметром до 150 мм апробированные при создании малошумящих транзисторов рНЕМТ, мощных транзисторов ДрНЕМТ, гетеробиполярных транзисторов НВТ, интегральных приборов, объединяющих в одной структуре нормально открытый и нормально закрытый транзисторы E/D-рНЕМТ, интегральных приборов, объединяющих в одной структуре полевой и биполярный транзисторы НЕМТ/НВТ. Определено влияние конструкции гетероструктур на характеристики изготовленных транзисторов и проведена ее корректировка для достижения требуемых параметров.

В результате приборной апробации гетероструктур на подложках GaAs определено следующее:

- уменьшение толщины барьерного слоя между канальным слоем и затвором в гетероструктуре рНЕМТ для малошумящих транзисторах обеспечивает уменьшение коэффициент шума в изготовленных приборах;
- уменьшение содержания индия в канальном слое InGaAs до 16% в гетероструктуре ДрНЕМТ для мощных транзисторов обеспечивает увеличения

выходной мощности и пробивного напряжения сток-затвор в изготовленных приборах;

- при создании гетероструктур НВТ, использование эмиттерных слоев на основе InGaP (по сравнению с AlGaAs), обеспечивает большее напряжение пробоя эмиттер-база, а также контактный слой из GaAs обеспечивает уменьшение сопротивления омического контакта при изготовлении НВТ транзисторов, работающих в диапазоне частот до 30 ГГц;
- для изготовления НВТ транзисторов, работающих на частотах свыше 30 ГГц, целесообразно использовать гетероструктуры НВТ с эмиттерным слоем AlGaAs.

Также оптимизированы толщины барьерных слоев в гетероструктурах E/D-pHEMT с несколькими стоп-слоями для обеспечения разницы пороговых напряжений нормально открытого и закрытого транзистора больше 1 В, оптимизирована толщина стоп-слоя InGaP в гетероструктурах НВТ/HEMT для обеспечения лучшей устойчивости к селективному травителю.

Разработаны, изготовлены и апробированы гетероструктуры на подложках InP большого диаметра для создания транзисторов pHEMT и НВТ мм-диапазона частот.

Основные параметры изготовленных из разработанных гетероструктур транзисторов соответствуют достигнутому уровню мировой и отечественной практики и подтверждают возможность применения гетероструктур A^3B^5 на основе слоев твердых растворов InGaAlAsP на подложках GaAs и InP для промышленного изготовления отечественных СВЧ-транзисторов и СВЧ МИС в частотном диапазоне до 220 ГГц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке субсидии Министерства промышленности и технологии № 020-11-2021-1162.

Литература

1. Gunter L. et al. The First 0.1 μ m 6" GaAs PHEMT MMIC Process // CS MANTECH Conference, April 24–27, 2006, Vancouver, British Columbia, Canada.

УДК 621.315.592

Исследование влияния чистоты химических реактивов раствора Каро для удаления органических соединений на примере рiп-диодных структур

Веретенников Д. А., Голубков С. А., Петушков В. Л., Григорьева Т. В.
АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
veretennikov@zntc.ru

Проведено исследование возможности загрязнения кремниевых подложек легирующими примесями при изготовлении рiп-диодов. С применением нестационарной спектроскопии глубоких уровней (НГСУ) было показано, что обработка в смеси Каро приводит к нежелательному легированию подложек серой и существенному изменению характеристик рiп-диодов. В частности, измерение вольт-фарадных характеристик приборов продемонстрировало недопустимое возрастание напряжения полного обеднения. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологий изготовления рiп-диодов и других полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: рiп-диоды; загрязнение серой; высокоомный кремний; НГСУ; напряжение полного обеднения.

В настоящее время полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений на рiп-диодах широко используются в прикладной технике, научных исследованиях, физике элементарных частиц, являются важным инструментом в арсенале ядерной физики [1, 2]. Рiп-диод — разновидность полупроводникового детектора, в котором между областями дырочной и электронной проводимости находится высокоомный собственный полупроводник (i-область). Структурная схема рiп-диода в разрезе представлена на рис. 1.

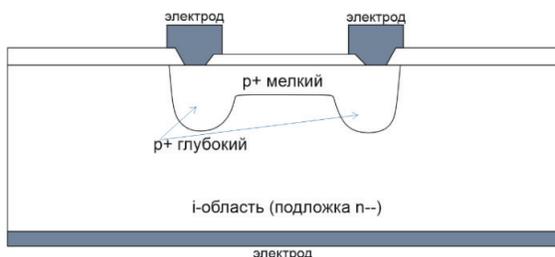


Рис. 1. Структурная схема рiп-диода

В ходе технологического процесса в подложку высокоомного кремния могут внедряться посторонние примеси, которые могут изменять характеристики детектора. В данной работе было исследовано влияние нежелательных примесей, вносимых в процессе изготовления, на характеристики создаваемых рiп-диодов.

Для изготовления экспериментальных образцов рiп-диодов использовалась химическая обработка в смеси Каро, представляющей собой смесь перекиси



водорода (H_2O_2) и серной кислоты (H_2SO_4). При данном виде обработки на поверхность пластины может осаждаться сера и внедряться в подложку при последующих высокотемпературных операциях. Коэффициент диффузии серы в кремнии довольно высок и составляет $3,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ при 1100°C . Концентрация донорной примеси в исходной подложке составляет около 10^{11} – 10^{12} см^{-3} , тогда как предельная растворимость серы в кремнии — 10^{15} см^{-3} [5, с. 48]. Таким образом, сера способна в значительной степени влиять на сопротивление подложки.

Для определения влияния серы на характеристики полупроводниковой подложки использовалась нестационарная спектроскопия глубоких уровней (deep level transient spectroscopy, DLTS). Метод позволяет обнаружить глубокие уровни в широком диапазоне энергий и с достаточной точностью определить их параметры.

Литература

1. Акимов Ю. К. и др. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Под ред. Акимова Ю. К. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 344 с.
2. Соминский М. С. Полупроводники. — Ленинград: Наука, 1967. — 440 с.
3. Резников В., Губырин Л. Высокочастотные и СВЧ р-і-п диоды // Компоненты и технологии, 2000. — № 3. — С. 42–43.
4. Gatti E., Manfredi P. F. Processing the signals from solid-state detectors elementary — particle physics // La Rivista del Nuovo Cimento, 1986. Vol. 9. S. 3. 146 p.
5. Актуальные проблемы материаловедения / Пер. с англ. под ред. Е. И. Гиваргизова, М. М. Колтуна. — Вып. 1, 1982. — 271 с.

УДК 621.315.592

Влияние подлегирования поверхности на темновой ток утечки детекторов ионизирующего излучения

Веретенников Д. А., Голубков С. А., Петушков В. Л., Григорьева Т. В.

АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
veretennikov@zntc.ru

Проведено исследование влияния подлегирования поверхности на темновой ток утечки детекторов ионизирующего излучения. Показано, что при дополнительном подлегировании поверхности высокоомной кремниевой подложки темновой ток утечки детекторов ионизирующего излучения снижается в 2–3 раза.

Ключевые слова: рin-диоды; ток утечки; высокоомный кремний; подлегирование; напряжение полного обеднения.

Рin-диод является распространенной структурой для полупроводниковых детекторов. По сути, рin-диод представляет собой сильно р- и п-легированные слои с внутренним объемным слоем между ними. Технически невозможно иметь полностью собственный кремний, поэтому основной слой слегка п- или р-легирован. Структурная схема рin-диода в разрезе представлена на рис. 1.

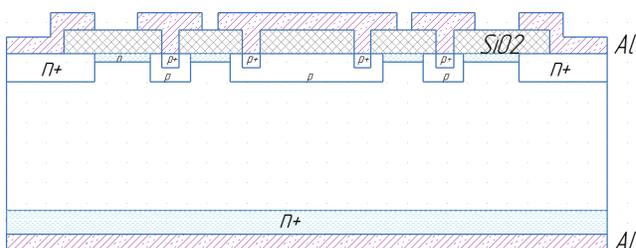


Рис. 1. Структурная схема рin-диода

Для уменьшения темнового тока при изготовлении рin-диода важно учитывать, как время жизни неравновесных носителей заряда, так и наличие примесей, которые могут вызвать глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне кристалла. Низкий уровень темнового тока важен для оптимизации шумового уровня и динамического диапазона входных усилителей рin-диода. Темновой ток утечки рассчитывается по формуле: $I_{ут} = I_{опз} + I_{идифф} + I_{пов}$, где $I_{опз} + I_{идифф}$ — объемный ток утечки, $I_{опз}$ — ток в ОПЗ, $I_{идифф}$ — ток генерации неосновных носителей заряда, $I_{пов}$ — поверхностный ток утечки.

Подлегирование (имплантация примеси п-типа) высокоомной кремниевой подложки п-типа позволяет снизить влияние ионов на $I_{пов}$, которые могут находиться на поверхности рin-диода. Также при подлегировании поверхности увеличивается концентрация основных носителей заряда, что способствует уменьшению концентрации неосновных носителей, позволяя снизить генерацию дырок с обрванных связей в ОПЗ рin-диода [1].



В данной работе было проведено исследование влияния подлегирования поверхности на темновой ток утечки детекторов ионизирующего излучения. Показано, что при дополнительном подлегировании поверхности высокоомной кремниевой подложки общий темновой ток утечки детекторов ионизирующего излучения снижается в 2–3 раза.

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов в 2-х книгах / Перевод с английского канд. физ.-мат. наук В.А. Гергеля и канд. техн. наук В.В. Ракитина под редакцией д-ра физ.-мат. наук Р.А. Суриса. — М.: Мир, 1984.

УДК 53.083.98

Контроль ионных загрязнений на поверхности полупроводниковых пластин

Волоховский А. Д.¹, Нелюбин И. В.^{1,2}, Рудометов Я. А.^{1,2}¹ ООО «НМ-Тех»124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4,4a
volohovskiy@nm-tech.org² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе проводится сравнение методов контроля загрязнений поверхности полупроводниковых пластин ионами металлов. Приводятся возможности и ограничения каждого из методов. Приводится система контроля ионных загрязнений, внедрение которой позволило управлять ионными загрязнениями, искать и устранять их источники.

Ключевые слова: ионные загрязнения; измерение фото-ЭДС; SPV; рентгеновская флуоресцентная спектроскопия в условиях полного внешнего отражения; TXRF; масс-спектрометрия в индуктивно-связанной плазме; ICPMS; газофазная декомпозиция; VPD.

Контроль ионных загрязнений имеет особое значение в обеспечении выхода годных интегральных схем. Существует четыре основных метода позволяющих численно оценить уровень концентрации свободных ионов металлов:

1) Измерение вольт-фарадных характеристик МОП-структур (C-V). Для применения метода требуется предварительное формирование омического контакта к поверхности измеряемой МОП-структуры.

2) Измерения поверхностного фото-ЭДС (SPV), что позволяет определять диффузионную длину неосновных носителей заряда в полупроводниках и через нее оценивать интегральную концентрацию ионных загрязнений.

3) Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия в условиях полного внешнего отражения (TXRF). TXRF является прямым методом. Недостатком метода является низкая чувствительность к легким элементам, таким как Na, Mg, Al.

4) Масс-спектрометрия в индуктивно-связанной плазме с предварительной газофазной декомпозицией образца (VPD-ICPMS). Пробоподготовка осуществляется путем травления приповерхностного слоя в парах HF, и сбор продуктов этой реакции для анализа в масс-спектрометре.

Подготовка VPD может быть применена для метода TXRF. В этом случае каплю содержащую продукты реакции высушивают с помощью ИК-лампы.

Основные особенности методов сведены в табл. 1.

При производстве интегральных схем, необходимо контролировать все источники ионных загрязнений: загрязнения обратной стороны подложки, происходящие при контактировании пластины с элементами транспортных систем технологического оборудования, а так же загрязнения, привнесенные в процессе технологических обработок.

Таблица 1. Сравнение методов контроля ионных загрязнений

Наименование параметра	Метод				
	C-V	SPV	TXRF	VPD-TXRF	VPD-ICPMS
Чувствительность (предельно обнаруживаемая концентрация), 10^8 ат/см ²	0,1–1,0 для всех типов ионов		Al 5000 Ti 150 Cr 225 Fe 60 Co 60 Ni 100 Cu 60 Zn 150 Mo 580 W 1250	Al 90 Ti 3 Cr 3 Fe 0.6 Co 0.6 Ni 1 Cu 0.6 Zn 2 Mo 7 W 100	Al 0.6 Ti 1.7 Cr 0.9 Fe 0.5 Co 0.2 Ni 0.3 Cu 0.08 Zn 0.3 Mo 0.3 W 0.04
Возможность определения типа иона	Нет	Нет, за искл. Fe, Cu, Co	Да		
Тип метода	контактный	бесконтактный			
Тип образцов	МОП-структуры	пластины с пленкой SiO ₂	«голые» пластины, пластины с пленкой SiO ₂ , Si ₃ N ₄		
Тип получаемой информации	точечная	карта поверхности	точечная, карта поверхности	среднее значение по зоне сканирования	
Необходимость предварительной подготовки образца	Да (за искл. специальных реализаций)	Нет (подготовка производится непосредственно в измерительной установке)			
Время контроля одной пластины, мин.	~10-15	~15	~40	~60	~20

Для контроля ионных загрязнений обратной поверхности подложки на нашем предприятии применяется метод TXRF. Чувствительность метода для большинства переходных металлов, в том числе для Fe и Cu, находится на уровне $5 \cdot 10^9$ ат/см², что является достаточным для технологических уровней до 90–130 нм включительно. Для увеличения чувствительности метода может быть применена предварительная газофазная декомпозиция образца (VPD).

Контроль ионных загрязнений, привнесенных в результате технологических процессов особенно важен для процессов формирования подзатворного диэлектрика, т. к. загрязнения привнесенные на данном этапе напрямую влияют на выходные характеристики и надежность формируемых ИС. Для этого на нашем предприятии применяется метод SPV. С использованием дополнительных методологических ухищрений, данный метод позволяет отделить основные загрязнители (ионы Fe, Cu, Co) от остальных типов ионов.

В настоящее время на нашем предприятии производится внедрение метода VPD-ICPMS. Метод VPD-ICPMS обладает чувствительностью к Fe и Cu на уровне

$1 \cdot 10^7$ ат/см², что позволяет применять его для технологических уровней вплоть до 28 нм и ниже. Метод позволяет анализировать как поверхность образца, так и содержание ионов в объеме пленок SiO₂ и Si₃N₄. Поэтому, данный метод будет внедряться и для контроля загрязнений, привносимых транспортными системами установок, и для контроля загрязнений, привносимых в технологических процессах цикла FEOL. Возможность метода работать с пленками Si₃N₄ особенно важна для постановки технологии энергонезависимой памяти.



УДК 537.533.35

Исследование эффекта сужения ширины линии фоторезистивной маски при измерениях методом растровой электронной микроскопии

Рудометов Я. А.^{1,2}, Нелюбин И. В.^{1,2}¹ ООО «НМ-Тех»124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а
info@nm-tech.org² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе рассмотрен эффект «сужения» ширины элементов фоторезистивной маски при воздействии пучка электронного микроскопа. Получены зависимости изменения размеров от ускоряющего напряжения и дозы экспозиции, а также проведена аппроксимация зависимостей для вычисления истинных размеров элементов.

Ключевые слова: фоторезистивная маска; критические размеры; электронная микроскопия; метрология.

Введение

С уменьшением критических размеров (CD) технологии производства интегральной электроники ужесточаются требования к прецизионности контроля технологических процессов. Традиционно в качестве инструмента контроля процессов фотолитографии в производственном цикле применяется метод растровой электронной микроскопии (РЭМ). Однако, при использовании химически усиленных фоторезистов, контроль размеров элементов фоторезистивных масок с помощью РЭМ затруднен из-за наблюдаемого эффекта «сужения» ширины линии проявленного фоторезиста. Уменьшение ширины линии может достигать 30 %, в связи с чем метод РЭМ для контроля размеров фоторезистивной маски более нельзя назвать неразрушающим. В данной работе проведена серия экспериментов с КrF фоторезистами, используемыми при производстве интегральных схем с топологическими нормами 90–250 нм, для оценки величины уменьшения ширины линии фотомаски при проведении исследований на РЭМ. Определено влияние основных факторов, определяющих величину уменьшения размеров (ускоряющее напряжение, доза экспозиции электронным пучком) [1–3].

Эффект «сужения» ширины линии

На рис. 1. представлена типичная зависимость изменения критического размера линии фоторезиста от длительности воздействия электронным пучком (количества измерений).

Механизм «сужения» заключается в расщеплении карбонильных групп молекул фоторезиста при воздействии на них потока электронов. Стоит отметить, что результат первого измерения (т.н. «CD₁») на самом деле не является истинным («CD₀»), т.к. это измерение всегда производится уже после воздействия первой дозы электронного потока.

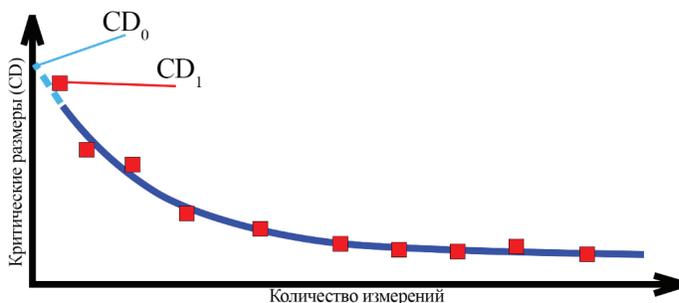


Рис. 1. Уменьшение CD от экспозиции электронным пучком (количестве измерений)

Экспериментальные результаты

В качестве исследуемых образцов были изготовлены структуры фоторезистивной маски, представляющую собой решетки из линий проявленного KtF фоторезиста на кремниевых пластинах диаметром 200 мм. Измерения латеральных размеров проводились с помощью автоматизированного электронного микроскопа с разрешением 2,0 нм.

Были получены зависимости уменьшения ширины линии фоторезиста от ускоряющего напряжения (в диапазоне от 400 до 1200 В), а также от времени воздействия на образец (от 0 до 145 секунд). Показано, что для всех зависимостей наблюдается насыщение, после которого изменение ширины линии перестает значительно меняться с ростом длительности измерений (дозы).

Заключение

В настоящей работе показано, что максимальный уход критических размеров (ΔCD_{MAX}) за определенное время для исследуемых фоторезистов составляет 12–17 нм, что составляет 7–10% от изначального значения ширины линий. Зависимость величины ΔCD_{MAX} от ускоряющего напряжения имеет линейный характер, а зависимость от дозы экспозиции — экспоненциальной, что хорошо согласуется с результатами исследований из литературы. Исходная вязкость фоторезиста незначительно влияет на величину ΔCD_{MAX} и время насыщения. Геометрические параметры фоторезистивной маски (ширина, толщина линий) практически не влияют на эту величину и время насыщения. По полученным данным проведена аппроксимация, что позволило вывести зависимости, позволяющие рассчитать истинные размеры структур до экспозиции электронным пучком. Для этого потребовалась проверка независимым методом измерений. Представлены рекомендации о проведении измерений структур из фоторезиста методом электронной микроскопии, а также приведены рассуждения о применении метода оптической скаттерометрии для исключения влияния рассматриваемого эффекта.

Литература

1. Bunday B. et al. Characterization of CD-SEM metrology for iArF photoresist materials // Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXII. SPIE, 2008. Vol. 6922. P. 468–484. DOI: 10.1117/12.774317.

2. Bunday B. et al. SEM metrology for advanced lithographies // Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXI. SPIE, 2007. Vol. 6518. P. 798–809.
3. Wu C. H. J. et al. Investigation on the mechanism of the 193-nm resist linewidth reduction during the SEM measurement // Advances in Resist Technology and Processing XVIII. SPIE, 2001. Vol. 4345. P. 190–199.

УДК 67.02

Исследование и разработка метода совмещения фотомаски первого слоя металлизации в кремниевой технологии с проектными нормами 250 нм

Мищенко В. В.

ООО «НМ-Тех»

*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4,4а
mishenko@nm-tech.org*

В работе продемонстрирована методика исследования пластин с помощью новой, внеосевой системы совмещения, использующей несколько порядков дифракции. В рамках исследования получены зависимости параметров стратегии совмещения для пластин с толстым слоем первой металлизации.

Ключевые слова: фотолитография; совмещение; влияние процессов ХМП и осаждения на совмещение.

Известной проблемой в мировой практике является совмещение слоя для травления первой металлизации, к структурам прошедшим полировку и осаждение металла. Планаризация поверхности и заполнение канавок вольфрамом и алюминием приводит к невозможности считать метки совмещения. Переход к более совершенным системам совмещения позволил получать сигнал от меток, закрытых слоем первой металлизации, но стратегия совмещения для таких меток требует исследования и разработки этого процесса.

В рамках исследования рассматривались метки типа ХРА, расположенные во вскрытых от металла областях и используемые старой системой совмещения, и метки, расположенные в дорожке реза SPM-АН11 и, улучшенные для получения сигнала 3, 5 и 7 порядков дифракции: SPM-АН32, SPM-АН53, SPM-АН74 соответственно.

Проведенная работа, показывает методику исследования пластин с помощью новой системы включающую, оценку всех меток, сформированных в разных слоях, по всей площади пластины, сравнение сигнала до и после нанесения фоторезиста, и его влияние на уровень сигнала, сравнение излучателей с разной длиной волны и зависимость сигнала от нее, результирующее совмещение с разными комбинациями параметров системы совмещения для оценки влияния предыдущих обработок, типа метки, ее модификации и величины случайной ошибки.

По полученным результатам разработана стратегия совмещения, использующая метки пятого порядка, расположенные по всей площади пластины, и красный лазер системы совмещения. В рамках проверки результатов обработана продуктовая партия с использованием старого метода совмещения, включающего дополнительные операции вскрытия металла и большие ХРА метки, и нового, использующего выбранные в результате исследования метки и параметры совмещения, позволяющего отказаться от дополнительных операций. Новая стратегия позволяет получать стабильное совмещение в рамках спецификации для технологии без затрат на дополнительные операции.



Литература

1. Overlay metrology: the systematic, the random and the ugly / Neal Sullivan, Jennifer Shin // AIP Conf. Proc., Gaithersburg, Maryland (USA), 1998. 6 p.
2. Fundamental Principles of Optical Lithography / Chris Mack // The Science of Micro-fabrication — USA.: Austin, 2007. P. 90–105.
3. Yazdani N. R., Apelgren E. M., Edwards R. D., Simmons M. A., Brown S. E. Extending the life of TTL-alignment steppers to 65-nm technology // 2007 International Symposium on Semiconductor Manufacturing, Santa Clara, CA, USA, 2007. 4 p.
4. K. John Prasad, D. Arunagiri Rajan, Yew-Kong Tan, Gin Ping Sun, Morgan S., Phillips M. W-CMP alignment using ASML's ATHENA system on an I-line stepper // 26th Annual International Symposium on Microlithography, Santa Clara, CA, United States, 2001. P. 1–10.

УДК 538.956

Низкотемпературное осаждение оксида алюминия методом атомно-слоевого осаждения**Кузьмичёв Д. С., к. ф.-м. н.***Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
kuzmichev.ds@mipt.ru*

В докладе будут представлены результаты исследования по формированию оксида алюминия методом АСО при температуре процесса ниже 150С, в том числе локального осаждения оксида алюминия за счет активации поверхности с помощью ультрафиолетового излучения.

Ключевые слова: диэлектрики; атомно-слоевое осаждение; локальное осаждение.

Формирование диэлектриков при температуре процесса ниже 150 °С востребовано в различных областях — гибкая и органическая электроника, оптические покрытия, перовскитные солнечные батареи, а так же в качестве защитных слоев для печатных плат. Однако, в методах химического осаждения из газовой фазы, которые часто применяются для создания диэлектриков, низкие температуры осаждения приводят к наличию примесей, которые негативно влияют на характеристики покрытий. Среди методов осаждения из газовой фазы можно выделить атомно-слоевое осаждение (АСО), благодаря исключительному контролю толщины и однородности покрытия на сложном рельефе. В настоящий момент, многие научные группы находятся в поисках подходов по снижению примесей в диэлектриках получаемых методом атомно-слоевого осаждения и исследованию их свойств [1, 2]. В докладе будут представлены результаты исследования по формированию оксида алюминия методом АСО при температуре процесса ниже 150 °С, в том числе локального осаждения оксида алюминия за счет активации поверхности с помощью ультрафиолетового излучения.

Литература

1. Kim S., Lee S.-H., Jo I. H. et al. Influence of growth temperature on dielectric strength of Al₂O₃ thin films prepared via atomic layer deposition at low temperature // Sci. Rep., 2022. 12, 5124. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09054-7>.
2. Holden K. E. K., Witsell S. M., Lemaire P. C., Lemaire J. F. Ultraviolet photo-enhanced atomic layer deposition for improving dielectric properties of low temperature deposited Al₂O₃ // J. Vac. Sci. Technol. A, 2022. 40 (4): 040401. URL: <https://doi.org/10.1116/6.0001865>.



УДК 621.382.323

Проблематика и особенности ускоренного метода оценки надежности МОП-транзисторов на воздействие горячих носителей заряда

Воеводин А. В., Селецкий А. В. к. т. н., Мясников С. Ю.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

avoevodin@niime.ru

Рассмотрены основные задачи, сформированные при проведении исследований на воздействие горячих носителей методом ускоренных испытаний на пластине для оценки надежности субмикронных МОП-транзисторов. Намечены направления их решения в целях повышения качества исследований и оценки надежности.

Ключевые слова: надежность; горячие электроны; ускоренные испытания; WLR.

Исследования и испытания на надежность элементной базы современных отечественных технологий проводятся как на этапах разработки техпроцессов, приборов, так и при квалификации технологий и опций, при переносе их с одной фабрики на другую. В современных условиях подстройки технологий под широкую номенклатуру изделий — это является актуальной задачей. Одним из основных доминирующих деградационных процессов в МОП-транзисторах, приводящих к сдвигу характеристик и определяющих надежность, является инжекция горячих носителей [1]. На основе накопленного опыта проведения исследований на воздействие горячих носителей выявлен ряд особенностей и сформированы требования, которые необходимо учитывать еще на стадии разработки топологии тестового кристалла. Это нужно не только для полноценного и всестороннего проведения исследований, но и для обеспечения качества разрабатываемых изделий [2].

Исследования на горячие носители проводились методом ускоренных испытаний на пластине по КМОП-технологиям на КНИ и объемном кремнии (90 нм — 250 нм). В зарубежных стандартах это называется (WLR testing — Wafer — level — reliability testing) [3, 4]. Он заключается в исследовании тестовых транзисторов под воздействием ускоряющих деградацию факторов, так называемых «стрессовых» режимов. Ускоряющими факторами здесь являются повышенные напряжения на терминалах транзистора, подобранные как «наихудший случай» влияния горячих носителей [3, 4]. Однако, несмотря на ускорение, исследования занимают, в среднем, от недели до нескольких месяцев (в зависимости от номенклатуры транзисторов и количества тестов). Исходя из этого существует необходимость разработки оценочного «экспресс-теста» на надежность, который в случае выявления быстрой деградации позволил бы отсечь необходимость в длительных WLR исследованиях.

Из опыта проведения WLR исследований на горячие носители определены актуальные для решения задачи и сформирован ряд технических требований к тестовым структурам для обеспечения качества разработки и исследований на надежность элементной базы. Проблематику задач можно классифицировать следующим образом:

1) Нормативные

- а) Модернизация отечественных стандартов, методик для современных методов исследований и оценки надежности.
- б) Нарботка опыта и разработка регламента по установлению критериев отказа и годности для оценки надежности приборов методом WLR исследований.

2) Проектно-технические

- а) Разработка полного состава тестовых структур надежности и включение их в тестовый кристалл для WLR исследований на пластине.
- б) Применение при разработке тестовых структур надежности технических требований к выполнению, размещению и количеству тестов, согласно видам и методике испытаний.
- в) Планирование WLR исследований в проектных итерациях НИОКР.

3) Технологические

Любые изменения и отклонения техпроцесса могут критическим образом сказаться на надежности приборов. Так, при проведении ряда измерений выявлен заметный сдвиг ЭФП транзисторов (пороговое напряжение, токи насыщения) уже при небольшом форсировании напряжения питания. Частный случай плохого результата — это малый технологический запас. При этом транзисторы уже при питании работают с деградацией, а проведение WLR исследований на горячие носители затрудняется малым диапазоном подбора режима форсирования напряжения, т. к. ограничивается скорым пробоем.

- а) Достаточный технологический запас.
- б) При изменении техпроцесса, проводить оценку надежности на стабилизированном процессе [4].

Также оценка на надежность, особенно «экспресс» методом, может быть дополнительным инструментом разработчика в обеспечении качества изделия на проектных этапах.

Решение обозначенных выше задач помогут сформировать эффективный и качественный процесс разработки и контроля высоконадежных приборов, сократив при этом временные и материальные затраты.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. Издание 2-е, исправленное. — Москва, 2011. — 800 с. ISBN 978-5-94836-289-2. EDN PZDVKZ.
2. Строгонов А., Белых М., Пермяков Д., Полковников В. Методы проектирования БИС с учетом надежности // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2021. — № 3 (204). — С. 46–56. DOI: 10.22184/1992-4178.2021.204.3.4-6.56. EDN ZBXKKP.
3. Jedec JESD28-A, Procedure for Measuring N-Channel MOSFET Hot-Carrier-Induced Degradation Under DC Stress.
4. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: Часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69. EDN YQYYZB.



УДК 621.31

Исследование ВАХ элементов хранения энергонезависимой памяти SONOS в зависимости от площади

Червонный Д. В., Арилин Р. А., Скоморохов Д. В., Захаров П. С.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

dchervonnyu@niime.ru

Представлена зависимость логических окон ячейки памяти SONOS и скорость деградации при комнатной температуре логических состояний от площади и геометрии структуры.

Ключевые слова: логическое окно; SONOS; встроенная память; скорость деградации; зависимость окна памяти от площади; ВАХ SONOS.

Технология изготовления ячеек энергонезависимой памяти, в которой в качестве запоминающего слоя используется нитрид кремния была разработана в конце 1960-х — начале 1970-х. С каждым десятилетием совершенствование техпроцесса приводило к масштабированию ячеек памяти SONOS, и как следствие — ужесточению требований к электрическим характеристикам структуры [1].

Разработанная в АО «НИИМЭ» ячейка памяти SONOS интегрирована в маршрут изготовления технологического процесса КМОП с проектными нормами 180 нм [2]. Одними из ключевых параметров, критично влияющих на электрические характеристики ячейки, являются площадь и соотношение ширины и длины затвора (W/L) [3]. Из классической физики полупроводниковых приборов известно, что увеличение количества квадратов (соотношение W/L) приводит к увеличению тока, протекающего через транзистор. Поскольку ячейка памяти — элемент, у которого пороговое напряжение зависит от величины заряда в области запоминающего слоя [4], то и величина тока ячейки в двух отличающихся логических состояниях будет варьироваться от площади и размера затвора структуры.

Данное предположение было проверено на двух элементах памяти с площадью не более 8 мкм^2 и 4 мкм^2 и соотношением $W/L = 8$ и 4 соответственно. Результаты продемонстрированы при фиксированных режимах PROG (запись логической «1») и ERASE (стирание в логический «0») посредством механизма туннелирования заряда через туннельный окисел в «запоминающий» слой. Изучено поведение логического окна ячеек при температуре 25°C .

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.
2. Червонный Д. В., Арилин Р. А., Матвеев Н. Н., Скоморохов Д. В., Петров А. Г. // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 228–229.
3. Yongling Ren. Trapping and Decay of Negative Charge in Silicon Nitride Films for Photovoltaic Applications. P. 83–94.
4. Червонный Д. В., Арилин Р. А., Болычев Д. И. // Наноиндустрия, 2021. — Т. 13. — № S7 (107). — С. 180–181.

УДК 537.226.4:621.3.014.6

Корреляция ресурса переключений и токов утечки сегнетоэлектрических элементов хранения на основе**Константинов В. С., Захаров П. С., к. ф.-м. н.**

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

vkonstantinov@niime.ru

В работе исследован характер изменения токов утечки сегнетоэлектрических элементов хранения на основе $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ под действием температурного воздействия и их связь с ресурсом переключения.

Ключевые слова: диоксид гафния; сегнетоэлектричество; токи утечки; ресурс переключения.

Сегнетоэлектрическая память FeRAM — это память, которая работает на одноименном эффекте, который заключается в обратимом переключении направления поляризации диполей сегнетоэлектрика внешним полем и сохранении этого направления после снятия воздействия. FeRAM является одним из перспективных кандидатов на роль универсальной памяти, которая совмещает функции длительного хранения информации и оперативной памяти. Как следствие, к элементам хранения FeRAM предъявляются высокие требования как к длительности хранения записанного логического состояния, так и к ресурсу переключений. Однако прямая проверка ресурса хранения не только требует значительное время, но и является деструктивным методом. По этой причине актуально построение неструктивного способа оценки ресурса переключений. Как показано в настоящей работе, для решения этой задачи в случае элементов хранения FeRAM на основе тонких сегнетоэлектрических пленок $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ можно использовать токи утечки и особенности их изменения под действием температурного отжига.

С 2011 года [1] диоксид гафния известен как перспективное материаловедческое решение на замену используемым в настоящее время в серийных микросхемах FeRAM сегнетоэлектрикам на базе цирконата-титаната свинца (ЦТС), которые имеют ограниченную совместимость с современной КМОП-технологией и сложности с масштабированием для субмикронных норм. Последующие работы, включая исследования отечественных ученых [2–4], подтвердили и дополнили сделанное открытие, выявив сегнетоэлектричество в HfO_2 с добавлением La, Al и Zr. Проведенные исследования сегнетоэлектриков на основе HfO_2 выявили особую роль кислородных вакансий в них [5, 6], которые, с одной стороны, необходимы для стабилизации орторомбической фазы $\text{Pbc}2_1$, обуславливающей сегнетоэлектричество в HfO_2 , и, с другой стороны, они — причина токов утечки и потери записанного состояния при длительном хранении.

В подробной работе А.А. Чуприк [7] показала, что основным механизмом потери записанного логического состояния в сегнетоэлектрических пленках $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ при длительном температурном воздействии на них является импринт. Импринт — это явление возникновения внутреннего электрического поля сегнетоэлектрика в результате обратного захвата электродами электронов из кислородных



вакансий в приграничном слое. Обратный захват вызван кулоновским отталкиванием электронов и центров отрицательного заряда диполей. Как следствие, на границе «электрод-сегнетоэлектрик» возникает дополнительный потенциальный барьер, который снижает токи утечки. В случае термической стабильности кислородных вакансий последующее электрическое циклирование должно полностью или частично восстановить их электрическую нейтральность и уровень токов утечки. В случае же, если электрическое циклирование приводит к росту токов утечки, то это указывает на высокую вероятность генерации кислородных вакансий и, как следствие, низкий ресурс переключений.

Чтобы экспериментально проверить характер изменения токов утечки, были использованы две группы по 18 элементов хранения, имеющие идентичную топологию. Каждый элемент хранения диаметром 30 мкм имел структуру $\text{TiN}/\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2/\text{TiN}$. Сегнетоэлектрический слой $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ формировался методом атомно-слоевого осаждения с использованием прекурсоров ТЕМАН и ТЕМАZ в отечественной установке АСО-НИИТМ и последующим высокотемпературным отжигом 450 °С. Первая группа элементов хранения имела ресурс менее 10^7 циклов переключения импульсами напряжения 3,5 В, элементы хранения второй группы продолжали функционировать после 10^9 циклов переключения импульсами напряжения 3,5 В. В элементах хранения каждой из групп три раза измерялся ток утечки при напряжении ± 2 В: первый раз — до температурного воздействия, второй — после отжига 1 час при +170 °С и третий — после отжига 1 час при +170 °С и электрического циклирования 10^5 импульсами для восстановления начальной поляризации.

Результаты измерений показали, что после отжига в обеих группах диапазон токов утечки сдвигается в сторону меньших по модулю значений. Последующее циклирование 10^5 импульсами для восстановления начальной поляризации в группе с высоким ресурсом переключений восстановило близкие к начальным значениям токи утечки или даже меньшие (по модулю), а в группе с низким оно, наоборот, привело к росту токов утечки. В частности, в группе с высоким ресурсом переключений ток утечки на напряжении +2 В до отжига находился в диапазоне 34–37 пА, после записи логического состояния положительным импульсом и отжига ток утечки снизился до уровня 1 пА и после восстановления логического состояния кратковременным циклированием импульсами напряжения 3,5 В вырос только до 16–18 пА. В группе с низким ресурсом переключений соответствующие диапазоны менялись от 129–168 пА до отжига к 24–27 пА сразу после отжига и 214–240 пА после восстановления логического состояния.

Таким образом, температурное воздействие и последующее восстановление начального логического состояния кратковременным циклированием в элементах хранения на базе $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ с низким ресурсом приводит к смещению токов утечки в сторону больших по модулю значений в то время, как в элементах хранения с высоким ресурсом переключений диапазон токов остается прежним или смещается в сторону меньших по модулю значений. Обнаруженную особенность поведения токов утечки можно использовать для неструктурной экспресс-оценки ресурса переключения элементов хранения FeRAM и выявления структур с заведомо низким ресурсом переключений.

Литература

1. Böске T. S. et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // *Applied Physics Letters*, 2011. Vol. 99. № 10.
2. Hyuk Park M. et al. Evolution of phases and ferroelectric properties of thin $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ films according to the thickness and annealing temperature // *Applied Physics Letters*, 2013. Vol. 102. № 24.
3. Chernikova A. G. et al. Ferroelectric properties of full plasma-enhanced ALD TiN/La:HfO₂/TiN stacks // *Applied Physics Letters*, 2016. Vol. 108. № 24.
4. Chouprik A. et al. Nanoscale doping and its impact on the ferroelectric and piezoelectric properties of $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ // *Nanomaterials*, 2022. Vol. 12. № 9. P. 1483.
5. Islamov D. R. et al. Impact of oxygen vacancy on the ferroelectric properties of lanthanum-doped hafnium oxide // *Applied Physics Letters*, 2020. Vol. 117. № 16.
6. Chouprik A. et al. Defects in ferroelectric HfO₂ // *Nanoscale*, 2021. Vol. 13. № 27. P. 11635–11678.
7. Chouprik A. et al. Origin of the retention loss in ferroelectric $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ -based memory devices // *Acta Materialia*, 2021. Vol. 204. P. 116515.



УДК 004.076.4

Влияние параметров импульсов записи/стирания на пороговое напряжение и долговечность EEPROM памяти

Сорокин Д. В.^{1,2,3}, Морозов Е. Н.¹, д. т. н., Шелепин Н. А.³

¹ АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
dbmoksor@gmail.com

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

³ ИИМЭ РАН

119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А

Исследованы характеристики EEPROM в зависимости от параметров программирования и циклирования. Определены оптимальные условия записи/стирания: 10–13 В, 2–10 мс. Подтверждена стабильность при 500 тыс. циклах. Результаты применимы для оптимизации устройств на основе EEPROM.

Ключевые слова: EEPROM; энергонезависимая память; пороговое напряжение; надежность.

Энергонезависимая память типа EEPROM широко применяется в современной электронике благодаря возможности многократной перезаписи данных и сохранения информации при отключении питания. Однако надежность и долговечность EEPROM памяти зависит от ряда факторов, в том числе от параметров программирующих импульсов и количества циклов записи-стирания.

Цель данного исследования — изучение зависимости порогового напряжения ячеек EEPROM памяти от амплитуды и длительности программирующего импульса, а также анализ изменения пороговых напряжений при многократном циклировании. Полученные результаты имеют важное значение для оптимизации процессов записи и стирания, что позволит повысить надежность и увеличить срок службы устройств на основе EEPROM.

В рамках исследования были проведены два эксперимента: определение оптимальных параметров программирующего импульса и оценка стабильности характеристик памяти при длительной эксплуатации.

Исследование проводилось на тестовых структурах, изготовленных на пластинах в АО «Микрон» по технологии КМОП+EEPROM 0,18 мкм. В качестве исследуемого элемента использовались соединенные параллельно ячейки памяти EEPROM в количестве 10 тыс. штук. Измерения проводились с использованием зондовой станции Cascade Summit 12000B-AP и полупроводникового анализатора параметров Keysight B1500A.

В ходе первой серии экспериментов изучалось влияние параметров программирующего импульса на разницу пороговых напряжений между состояниями «стерто» и «записано». Амплитуда программирующего напряжения варьировалась в диапазоне от 7,3 В до 16,3 В, а длительность импульса изменялась от 0,17 мс до 15 мс. Для каждой комбинации этих параметров измерялась разница пороговых напряжений ($V_{th}^E - V_{th}^W$), что позволило построить подробную картину зависимости характеристик памяти от условий программирования.

Вторая часть исследования была направлена на оценку стабильности параметров EEPROM при длительной эксплуатации. Для этого было проведено 500 тыс. циклов записи-стирания с использованием программирующих напряжений от 10 до 14 В при фиксированной длительности импульса 10 мс. В процессе циклирования измерялась разница пороговых напряжений в состояниях «стерто» и «записано», что позволило отследить изменения характеристик памяти с течением времени.

Результаты первого эксперимента показали, что увеличение амплитуды программирующего напряжения приводит к росту разницы пороговых напряжений, причем этот рост наиболее выражен в диапазоне от 10 до 13 В. При дальнейшем увеличении амплитуды наблюдается эффект насыщения. Аналогичная тенденция наблюдается и при увеличении длительности импульса, с наиболее заметным эффектом в диапазоне до 5 мс.

Анализ данных второго эксперимента продемонстрировал высокую стабильность характеристик EEPROM при многократном циклировании. Разница пороговых напряжений оставалась в пределах допустимого диапазона от $-0,5$ до $0,5$ В на протяжении всех 500 тыс. циклов, что свидетельствует о надежности исследуемой памяти. При этом наблюдались небольшие вариации в зависимости от используемого программирующего напряжения, с наиболее стабильными результатами при 10 В.

Интерпретация полученных результатов позволяет сделать вывод о существовании оптимального диапазона параметров программирования для EEPROM. Амплитуды напряжения выше 10 В и длительности импульса до 10 мс обеспечивают наилучшее соотношение между эффективностью записи/стирания и долговременной стабильностью характеристик памяти.

Литература

1. Cappelletti P., Bez R., Cantarelli D., Nahmad D., Ravazzi L. CAST: An electrical stress test to monitor single bit failures in flash-EEPROM structures // *Microelectronics Reliability*, 1997. Vol. 37. № 2. P. 473–481.
2. Сорокин Д. В., Морозов Е. Н. Влияние режимов записи и стирания на характеристики элементов энергонезависимой памяти // *Микроэлектроника и информатика — 2024: тезисы докладов.* — Москва, 25–26 апреля 2024 г. — М.: МИЭТ, 2024. — С. 78.

УДК 004.94:621.382.323, 621.382.3:537.2

Методы оптимизации конструкции п-канальных LDD МОП-транзисторов для подавления эффекта горячих носителей заряда

Лапин А. Е.¹, Пеху Д. А.^{1,2}¹ ООО «НМ-Тех»124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а
alapin@nm-tech.org, pshu@nm-tech.org² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В статье продемонстрирован подход к оптимизации конструкции п-канального LDD МОП-транзистора, приведено исследование и анализ эффектов зарядки нитридного спейсера и деградации электрических характеристик прибора под воздействием горячих носителей. В результате оптимизации стока-истоковых областей и структуры нитридного спейсера удалось повысить надежность транзистора, при сохранении значений I_{ON} , I_{OFF} и V_{DS} .

Ключевые слова: МОП-транзистор; инжекция горячих носителей; паразитные заряды; LDD-область; TCAD.

К одному из наиболее значимых механизмов износа субмикронных п-канальных МОП-транзисторов относят явление деградации под воздействием горячих носителей (HCD — hot carrier degradation) [1]. Игнорирование данного эффекта на этапе разработки и интеграции прибора в технологический маршрут изготовления ИС может привести к дополнительным временным затратам на изготовление и проведение испытаний образцов с последующей оптимизацией конструкции прибора.

Типовая конструкция субмикронных МОП-транзисторов содержит области слаболегированного стока (LDD — lightly doped drain) и истока, формируемые посредством операции ионного легирования путем самосовмещения к диэлектрическим спейсерам, что способствует снижению инжекции горячих носителей в подзатворный оксид [2]. Однако данное решение может приводить к паразитным явлениям, ухудшающим надежность п-канальных LDD МОП-транзисторов и затрудняющим прогнозирование влияния HCD на их работоспособность. К таким явлениям относят эффект зарядки спейсера, вызванный инжекцией горячих носителей в его объем, и двухстадийный механизм деградации характеристик прибора, рассматриваемые в настоящей работе.

Ускоренные испытания, с применением различных образцов 3,3 В п-канальных LDD МОП-транзисторов, позволили установить особенности времязависимого изменения характеристик данных приборов. Путем проведенной в несколько этапов оптимизации конструкции приборов с применением средств приборно-технологического моделирования удалось достичь подавления паразитного эффекта зарядки спейсера, а также уменьшить интенсивность генерации горячих носителей за счет снижения максимальной величины тока подложки I_{SUBMAX} и напряженности электрического поля вблизи области стока без ухудшения таких терминальных характеристик прибора как I_{ON} , I_{OFF} и V_{DS} . Максимальное значение величины тока подложки I_{SUBMAX} было понижено на величину порядка 30–40%, тогда как

напряженность поля вблизи стока была уменьшена в среднем на 35%. Наблюдаемое до оптимизации резкое увеличение относительного отклонения тока стока, измеренного в линейном режиме, после переработки конструкции спейсеров было снижено более чем в три раза, в зависимости от режима HCD испытаний.

Литература

1. Tam S., Ko P.-K., Hu C. Lucky-Electron Model of Channel Hot-Electron Injection in MOSFET's // IEEE Transactions on Electron Devices, 1984. Vol. 31. №9. P. 1116–1125.
2. Wang Q., Krautschneider W. H., Brox M., Weber W. Time dependence of hot-carrier degradation in LDD nMOSFETs // Proceedings of Insulating Films on Semiconductors Conference, 1991. 441 p.



УДК 621.3.049.774

Как изменялся маршрут КМОП СБИС при переходе от 130 нм к техпроцессам менее 90 нм: технологические вызовы и пути их решения

Носаева К. С., к. т. н.

ООО «НМ-Тех»

*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а
nosaeva@nm-tech.org*

В данной работе проведен анализ методов производства КМОП с технологическими нормами от 130 до 65 нм, выявлены принципиально новые блоки маршрута изготовления СБИС и технологические вызовы, которые необходимо преодолеть для поэтапного освоения передовых техпроцессов, а также возможные пути их решения.

Ключевые слова: КМОП СБИС; техпроцесс; методы производства.

Для реализации стратегии развития микроэлектроники и постепенный выход на импортнезависимость необходимо наличие действующих производств КМОП СБИС по техпроцессам 65 нм. Для поэтапного перехода от освоенной технологии 130 нм на меньшие технологические нормы необходимы разработка и внедрение новых технологических операций и блоков маршрута изготовления СБИС, которые представлены ниже:

- **Взаимная изоляция транзисторов.** Для изоляции микросхем в технологических нормах, включая 65 нм и менее, используется мелкошелевая изоляция, глубина которой варьируется в зависимости от техпроцесса и должна рассчитываться в САПР приборно-технического моделирования, как и параметры имплантации.
- **Фотолитография затвора.** Для формирования затвора длиной 90 и 65 нм традиционно используют сканеры с ArF лазерами, работающими на длине волны 193 нм.
- **Подзатворный диэлектрик.** Толщина оксида кремния, который традиционно являлся изолятором затвора, так же должна уменьшаться и масштабировалась со скоростью $\sim 0,7x$ за поколение примерно до норм 130 нм, но замедлилась на нормах 90/65 нм, поскольку достигла минимально возможной из-за эффекта короткого канала. Дальнейшее масштабирование невозможно, т. к. ток утечки затвора становится недопустимо высок [1].
- **Материал омических контактов.** Для техпроцессов от 130 нм до 65 нм в качестве материала для омических контактов используется силицид кобальта CoSi. Для минимизации эффекта короткого канала для необходимо увеличить концентрацию доноров, уменьшить температуру получения силицида кобальта CoSi, который традиционно используется для омических контактов, и адаптировать режимы отжига омических контактов в сторону уменьшения температуры [2].
- **Стрессинжиниринг.** Для увеличения подвижности носителей тщательно контролируется стресс, вызванный подложкой, стенками изоляции, силицидом и всеми диэлектрическими пленками.

- **Межуровневая изоляция и металлизация.** Большое внимание уделяется уменьшению задержки сигнала от транзистора к выводам. В межслойной изоляции для уменьшения скорости задержки сигнала традиционный материал диэлектрика FSG (диэлектрическая проницаемость $k = 3,6$) заменяется на материал с меньшей диэлектрической проницаемостью low-k-диэлектрик ($k = 2,7$), а традиционно используемый как металл разводки алюминий для технологических норм от 90 нм заменяется на медь, т.к. удельным сопротивлением меди ($1,7 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$) ниже удельного сопротивления алюминия ($2,8 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$) особенно при осаждении в узкие канавки. Кроме того, медь обладает более высокой устойчивостью к электромиграции. Двойной дамасский процесс, разработанный в 1990-х гг. в компании IBM [4] применяется для формирования многоуровневых систем медной металлизации и является стандартом для техпроцессов от 90 нм и ниже.

Нами был проведен анализ литературных источников и технологий, имеющихся на рынке и выявлены технологические вызовы и разработан план модернизации техпроцесса и оборудовании для перехода к выпуску микросхем с улучшенными параметрами и размером затвора 65 нм.

Литература

1. Green M. L. et al. Ultrathin (<4 nm) SiO₂ and Si–O–N gate dielectric layers for silicon microelectronics: Understanding the processing, structure, and physical and electrical limits // *Journal of Applied Physics*, 2001. Vol. 90. № 5. P. 2057–2121.
2. Sugii T., Watanabe K. and Sugatani S., Transistor design for 90 nm generation and beyond // *Fujitsu Science and Technology*, June 2003. Vol. 39. № 1. P. 9–22.
3. Nguyen B.-Y. et al. New Materials, Processes and Device Structures for 65 nm CMOS Technology Node and Beyond // *Proceedings — Electrochemical Society, MA2005-01*. P. 259–273.
4. Andricacos P. C. et al. Damascene copper electroplating for chip interconnections // *IBM Journal of Research and Development*, 1998. Vol. 42. № 5. P. 567–574.



УДК 666.29.056.5

Перспективные технологические решения в области высокотемпературной пайки и нанесения функциональных покрытий при изготовлении металлокерамических корпусов

Ахметгалиев Р. Ш.¹, Шугаев Ш. Н.¹, Ермолаев Е. В.¹, Егшин В. А.¹,
Сачков В. И.^{2,3}, Медведев Р. О.^{2,3}

¹ АО «Завод полупроводниковых приборов»

424003, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

³ ООО «НТЦ «Реасиб»

634055, г. Томск, мкр. Академический, 47-1

Разработан и внедрен технологический процесс нанесения автокаталитического Au толщиной менее 1 мкм, Толщиной более 1 мкм, находится на стадии внедрения и испытаний. Разработаны методики синтеза растворов для проведения химического осаждения, подготовки поверхности, нанесения покрытия и отмычки изделий. Разработана и апробирована схема применения порошков ПСр72 для создания паяльных паст в производстве МКК для ИС.

Ключевые слова: припой ПСр72; химическое золочение; технология пайки; металлокерамические корпуса.

Тенденция развития микроэлектроники, с одной стороны по пути увеличения степени интеграции, с другой стороны по пути минитюаризации электронной компонентной базы, неизбежно предполагает изменение конструкции металлокерамических корпусов, реализация которых требует применения новых технологических решений и модернизации стандартных приемов практически на каждой стадии их производственного цикла.

Одним из важных процессов в изготовлении металлокерамических корпусов является операция сборки оснований корпусов, используя предварительно подготовленные металлические комплектующие, с последующей их безфлюсовой высокотемпературной пайкой с применением твердого припоя.

В настоящее время количество паяемых элементов в одном корпусе нового исполнения, в частности корпусов типа PGA, BGA и LGA составляет несколько сотен и здесь появляются следующие проблемы при их изготовлении:

- сложность изготовления и применения миниатюрных прокладок припоя из фольги и ленты плющенной;
- сложность корректного позиционирования и фиксации прокладок;
- обеспечение стабильного уровня качества металлокерамического спая без дефектов в виде пор, щелей, неровностей в припойной галтели.

В качестве решения этих проблем в работе предлагается вместо стандартной фольги ПСр72 использовать паяльную пасту, изготовленную на основе высокодисперсного однородного по гранулометрическому составу порошка ПСр72, который специально разработан ООО «НТЦ «Реасиб» совместно с ТГУ под задачи АО «ЗПП».

Несомненным преимуществом паяльной пасты является отсутствие необходимости изготовления дорогостоящих штампов, сокращение объема отходов,

точное и дозированное нанесение на каждую паяемую зону с возможностью корректировки объема припоя, а также открываются перспективы разработки и внедрения универсальных систем автоматизированной сборки.

Как известно, после пайки основания корпусов требуют дальнейших технологических обработок, в том числе предполагающих нанесение защитно-функционального Au-покрытия с подслоем Ni.

Необходимо отметить, что одной из особенностей новых типов корпусов, особенно предназначенных для работы в СВЧ-диапазоне, является необходимость исключения «паразитных» элементов топологической схемы корпуса, которые служат на определенной стадии технологического процесса связью всех металлизированных элементов в единую электрическую цепь для последующего нанесения гальванического покрытия. Таким образом, отсутствие объединенных элементов в единую цепь, а также наличие в топологической схеме «особых» проводников с отличным от других сопротивлением не позволяет нанести требуемое покрытие гальваническим методом. Для решения этой задачи АО «ЗПП» разработан и внедрен технологический процесс нанесения иммерсионного золочения, позволяющий наносить золотое покрытие толщиной до 0,15 мкм.

В случае, где требуется нанесение золотого покрытия более 0,15 мкм в совокупности с требованием исключения проводников для обеспечения электрической связи всех покрываемых элементов корпуса при гальванических операциях, привело к необходимости разработать технологический процесс автокаталитического золочения.

Данные работы направлены на обеспечение импортозамещения сложных высокофункциональных корпусов микросхем и позволяют обеспечить технологический суверенитет микроэлектронной отрасли РФ.

Литература

1. ГОСТ 9.008-82. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Термины и определения.
2. Биронт В.С. Нанесение покрытий: учебное пособие для студентов вузов. — Красноярск: ГАЦМиЗ, 1994. — 160 с.
3. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование): учебное пособие для студентов вузов. — М.: Интермет Инжиниринг, 2004. — 624 с.
4. Вайнер Я.В., Дасоян М.А. Технология электрохимических покрытий. — Л.: Машиностроение, 1972. — 463 с.
5. Вишенков С.А. Химические и электрохимические способы осаждения металлопокрытий. — М.: Машиностроение, 1975. — 311 с.



УДК 621.3

Проблематика CoS и CoWoS корпусирования и методы их решения технологией Flip-Chip

Савушкин Г. А.

ООО «Остек-ЭК»

121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2

Savushkin.g@ostec-group.ru

Монтаж методом перевернутого кристалла (Flip-Chip) — ключевая технология корпусирования интегральных схем, применяемая в большинстве современных ПЛИС и других типах устройств, в связи с улучшенными относительно стандартного метода микропроводочных соединений электрическими, теплопроводящими и габаритными свойствами изделий. Выбор конкретного метода определяет сложность изготовления, электрические и тепловые параметры, а также область применения конечного электронного компонента.

Ключевые слова: Flip-Chip; монтаж на пластину; gold stud; CoWoS; CoS.

Технология монтажа методом перевернутого кристалла развивается с 1960-х годов, начиная с первых опытных изделий от компании IBM. Последовательно исследовались как различные материалы, которые могут использоваться для перемычек между кристаллом и подложкой, так и материалы подложки. Таким образом, в зависимости от типа и плотности контактов устройства, применяются такие способы создания микросоединений как: припойные бампы типа C4 (controlled collapse chip connection), свинцовые либо бессвинцовые, золотые бампы (gold stud bumps), медные бампы с припойной шапкой, бесприпойные медные бампы. У каждого из этих материалов и методов есть свои как преимущества, так и недостатки, определяющие его применение в устройствах, и перед разработчиками устройств стоит выбор, какой способ корпусирования является наиболее для них уместным в применении.

Критериями для выбора того или иного материала в большинстве случаев являются следующие факторы: требуемая плотность матрицы контактов, надежность соединения, материал подложки, стоимость оборудования для изготовления матрицы бампов и подложки, расчетная производительность изготовления электронных компонентов.

В докладе будут рассмотрены все основные методы бампирования и монтажа кристаллов с учетом данных критериев.

Золотые бампы (gold stud bumps) являются наиболее дешевой для освоения технологией Flip-Chip монтажа. Для бампирования применяется оборудование, конструкционно схожее с оборудованием для УЗ-сварки методом шарик-клин. Материалами площадок на подложке выступают либо Au, либо SnAg для монтажа методом термокомпрессии. Преимущества метода: дешевизна оборудования, простота технологии, высокая плотность контактов. Недостатки: последовательный (следовательно, медленный) монтаж бампов, невысокая надежность соединения, большое давление на подложку и кристалл в процессе монтажа.

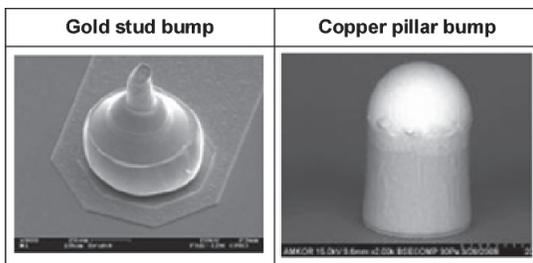


Рис. 1. Типичный внешний вид золотого бампа и медного бампа с припойной шапкой

Припойные бампы (тип С4) являются первым методом создания матрицы контактов, нашедшей свое массовое применение в изготовлении коммерчески успешных ПЛИС. Материалами могут выступать припои типов PbSn, SnAg, SnCu, InSn и др. Матрица может наноситься как последовательно методом лазерного монтажа, что уместно для малых серий из-за простоты оборудования в ущерб производительности, так и параллельно по всей пластине путем гальванического осаждения, что обеспечит более высокую производительность, но будет более дорогостоящим. Монтаж производится путем временной посадки на подложку с использованием флюса, и дальнейшим оплавлением припоя в печи. Преимущества: высокая надежность соединения, минимальное давление на подложку в процессе монтажа. Недостатки: низкая предельная плотность контактов (шаг не менее 150–200 мкм).

Медные бампы с припойной шапкой (тип С2) являются наиболее актуальным типом бампирования при корпусировании современных СБИС на текущий момент. Путем гальванического осаждения с использованием литографической маски изготавливаются медные столбики, а далее через промежуточные слои осаждается и оплавляется слой припоя, принимающий форму полусферы. Преимущества: наиболее высокая плотность соединений (до 50 мкм на текущий момент), малое давление на подложку в процессе монтажа, высокая надежность соединения (но ниже, чем в случае С4 бампов), масштабируемое параллельное нанесение контактов по пластине. Недостатки: высокая стоимость и сложность оборудования.

	SnPb C4 Bump	Pb-Free C4 Bump	Cu Pillar + Pb-free Cap	Cu μ -Pillar + Pb-free Cap
Structure				
Diameter	75 – 200 μm	75 – 150 μm	50 – 100 μm	10 – 30 μm

Рис. 2. Сравнительная иллюстрация различным типам бампов с использованием припоя



Бесприпойные медные бампы также изготавливаются методом гальванического осаждения, однако электрическое соединение обеспечивается путем контакта столбика с площадкой через анизотропный проводящий адгезив. Преимущества: высокая плотность контактов, простота процесса монтажа, широкий спектр допустимых материалов подложки. Недостатки: низкое качество соединения.

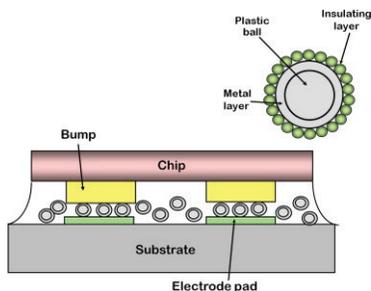


Рис. 3. Графическая иллюстрация Flip-Chip соединения с использованием бесприпойного бампа и анизотропного адгезива

Также разработаны и ограничено применяются безмасковое электролитическое осаждение бампов Ni/Au, гальваническое осаждение индиевых бампов и иные методы, однако их область ограничена специальными применениями в малых сериях.

Таким образом, выбор конкретного типа Flip-Chip корпусирования определяется не только электрическими свойствами и габаритными параметрами устройства, но и расчетными объемами производства и удельной стоимостью каждого электронного компонента. Однако наиболее совершенной и коммерчески успешной технологией является монтаж кристалла на матрицы медных столбиков с припойной шапкой (Cu Pillar/SAC205 или Cu Pillar/PbSn), и она предпочтительна при проектировании ПЛИС как по стандартному процессе Chip-on-Substrate, так и при 2,5D/3D-интеграции компонентов при процессах Chip-on-Wafer (CoWoS) и даже Wafer-on-Wafer (W2W).

УДК 621.3

Высокоточное утонение пластин с использованием стеклянного носителя со сверхнизким TTV и технологии временного монтажа

Суханов Д. А.

ООО «Остек-ЭК»

121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2

sukhanov.d@ostec-group.ru

Технология высокоточного утонения пластин — важнейшая часть производства устройств и современного корпусирования в производстве полупроводников. Пластины, утоненные менее чем 100 мкм, становятся все более востребованными в современной микроэлектронике. Важнейший параметр пластин — это их геометрическая форма, особенно TTV, на который во время утонения оказывает сильное влияние TTV слоя адгезива и TTV пластины-носителя.

Ключевые слова: утонение; полупроводниковые пластины; TTV; танталат лития; ниобат лития; современное корпусирование.

Утонение пластин — важнейшая часть производства устройств и современного корпусирования в микроэлектронике. Утоненные пластины на носителе более востребованы с толщиной <100 мкм. Для процессов после утонения необходимо наличие жесткой и термомеханически стабильной опоры — носителя.

Стекланные пластины, как носители, используются все больше из-за их свойств: КТР, низкий TTV, стабильность в широком диапазоне температур, химическая стойкость и различные методы дебондинга.

Для описания TTV стека (рис. 1) необходимо использовать совокупное TTV.

TTV стека ~ TTV пластины-носителя + TTV адгезива



TTV конечного изделия ~ TTV стека

Рис. 1. Воздействие TTV носителя и клеевого слоя на TTV утоненной пластины [1]

Технология формования носителей методом сплавления, обеспечивает превосходную плоскостность и TTV без дополнительной полировки, но не способна обеспечить TTV <1 мкм. Далее — финишная полировка.

Компании Corning изготовила стекланные пластины с девиацией TTV 0,2 мкм — пластины со сверхнизким TTV (рис. 2).

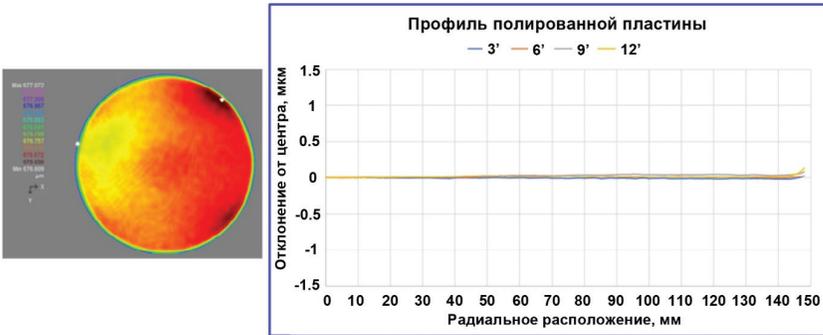


Рис. 2. Пластины с TTV ~0,2 мкм для Ø200 мм, ~0,4 мкм для Ø300 мм [1]

Искажение формы пластины можно понять термомеханическим моделированием. Упрощенная формула:

$$\approx 0,75L^2\Delta\alpha\Delta T \frac{E_s(1-\nu_g)t_s}{E_g(1-\nu_s)t_g^2},$$

Индекс s для свойств материала пластины, подлежащей утонению, E_s — модуля Юнга, t_s — толщина пластины, ν_s — коэффициент Пуассона и α_s — КТР. Для носителя — индекс g для тех же параметров соответственно, L — размер носителя.

Для пары пластин согласование КТР между ними является основным фактором в минимизации искажений. Если рабочая пластина изготовлена не из Si, а из GaAs, сапфира или SiC, то носитель должен обеспечить соответствующий КТР для этих материалов.

В результате необходимо использовать пластины, которые способны охватывать широкий спектр КТР (рис. 3).

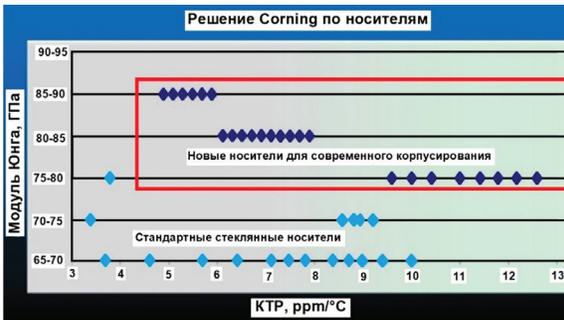


Рис. 3. Носители с КТР 3 — 12,6 ppm/°C. Источник: [1]

ALoT — это Advanced Lift-off Technologies. В зарубежной терминологии описывает технологию временного бондинга для создания более тонких и легких дисплеев, которую стали применять для полупроводниковых пластин.

Особенность ALoT — чрезвычайно тонкий связующий слой от субнанометров до десятков нанометров, который не добавляет TTV ко всему стеклу.

Для бондинга в ALoT требуется, чтобы носитель и пластина были обработаны, поверхности интерфейса были плоскими и гладкими.

Монокристаллические пластины пьезоэлектрических материалов (LiTaO_3 — LT и LiNbO_3 — LN) используются в РЧ акустических фильтрах. Современные беспроводные системы (4G/5G) используют частоты в диапазоне ГГц, которые выигрывают в характеристиках от тонких слоев LT <1 мкм.

Текущий процесс использует механическое утонение, а далее используют обработку поверхности ионным лучом (ИЛ) для улучшения ее однородности. Обработка ИЛ — медленный и дорогой процесс. Альтернатива — использование стеклянного носителя со сверхнизким TTV и бондингом ALoT. Концепция процесса показана на рис. 4.



Рис. 4. Утонение LT со стеклянным носителем со сверхнизким TTV и бондингом ALoT [1]

На рис. 5 показан стек пластин LT и стеклянной, после бондинга ALoT. Пустоты на краях могут вызвать расслоения во время утонения, поэтому должны быть удалены.



Рис. 5. Пластина: $\varnothing 150$ мм; LT и стекло; бондинг: ALoT. Толщина LT до утонения: 350 мкм [1]

Для утонения LT использовалась полностью автоматическая система шлифовки-полировки.



На рис. 6 показана пластина ЛТ после утонения до толщины 15 мкм.

На рис. 7 показана та же пластина с утоненным слоем ЛТ до толщины 5 мкм.

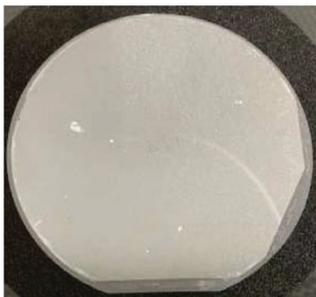


Рис. 6. Пластина ЛТ после утонения до толщины 15 мкм [1]



Рис. 7. Пластина ЛТ после утонения до толщины 5 мкм [1]

Измерение толщины после утонения по осям X и Y показано на рис. 8. Общее изменение толщины от центра пластины к ее краю составляет ~0,4 мкм.

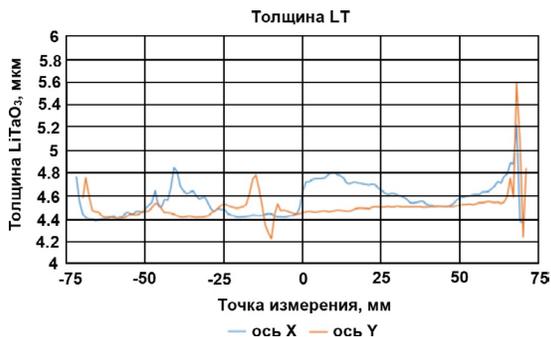


Рис. 8. Измерение толщины по осям X и Y [1]

Прецизионное утонение пластины, с использованием носителя зависит от двух факторов: носитель со сверхнизким TTV и бондинг с почти нулевым TTV. В результате TTV стека может составлять 0,2 мкм для пластины $\varnothing 200$ мм и 0,4 мкм для пластины $\varnothing 300$.

Литература

1. Zhang Jay. High-precision wafer thinning using ultra-low-TTV glass carrier and temporary bonding // Chip Scale Review, March — April 2024.

УДК 621.315.592

Кремниевые структуры со сквозными термомиграционными каналами

Середин Б. М.¹, д. т. н., Скиданов А. А.², Попов В. П.¹, д. т. н.,
Малибашев А. В.¹, к. т. н., Степченко А. Д., Гаврус И. В.¹, Царева Е. А.²

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

seredinboris@gmail.com

² АО «ВЗПП-Микрон»

394033, г. Воронеж, Ленинский просп., 119А

Показано повышение воспроизводимости метода термомиграции жидких включений (зон) на основе алюминия для формирования кремниевых структур со сквозными замкнутыми эпитаксиальными каналами с помощью системы не пересекающихся зон в виде колец или квадратов.

Ключевые слова: термомиграция; сквозные эпитаксиальные каналы; градиент температуры; кремний.

Введение

Метод термомиграции (ТМ) жидких включений (зон) в кристаллах на протяжении многих лет привлекает внимание полупроводниковых технологов. Локальная перекристаллизация с помощью зон на основе алюминия позволяет получать в пластинах кремния сквозные эпитаксиальные каналы p -типа заданной конфигурации за время от нескольких минут до одного часа в зависимости от выбранной температуры процесса ТМ [1]. Практическое применение метода сдерживается недостаточной воспроизводимостью, что обусловлено недостаточной изученностью сложных процессов, определяющих и сопровождающих термомиграцию зон.

Особенности технологии ТМ

Для повышения воспроизводимости метода ТМ при формировании кремниевых структур со сквозными каналами (КССК) в виде ячеек предложено использовать систему замкнутых непересекающихся линейных зон в форме колец или квадратов для их миграции через пластину (100). Применявшаяся ранее для этих целей ортогональная сетка прямолинейных зон приводила иногда к разрывам в местах пересечения зон, что снижало эффективность изготовления структур. Экспериментально показано, что при формировании подобных структур с размером ячеек от 1 до 3 мм относительное количество разорванных кольцевых или квадратных зон, а, следовательно, и дефектных ячеек не превышала 0,5% на пластинах диаметром 100 мм и толщиной 0,5 мм.

Полученные результаты

В процессе ТМ первоначальная форма зон изменялась: кольцевые зоны огранялись четырьмя плоскостями {111} и постепенно превращались в квадратные, а последние проявляли синхронное сближение сторон квадрата, ориентированных в направлениях $\langle 110 \rangle$ [2]. Угол отклонения ограненных частей замкнутых зон от градиента температуры составлял 25 градусов при температуре 1100 °С. В результате в пластине формировались замкнутые ячейки p -типа пирамидальной формы. Напряжение



лавинного пробоя p - n -переходов, образуемых на границах ячеек с кремнием КЭФ-4,5, составляло 250 В. Такие КССК использовали для последующего изготовления при изготовлении силовых диодов обратной полярной полярности с нижним расположением анодного вывода и полной краевой изоляцией дрейфовой зоны.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания Южно-Российскому государственному политехническому университету (НПИ) имени М. И. Платова по теме FENN-2023-0005.

Литература

1. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Попов В. П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. — М.: Металлургия, 1987.
2. Середин Б. М., Попов В. П., Малибашев А. В. Эффект трансформации линейной зоны в виде квадрата при ее миграции через пластину кремния ориентации {100} // Письма в журнал технической физики, 2024. — 50 (7), 17. DOI: 10.61011/PJTF.2024.07.57463.19805.

УДК 621.3

Компоненты молекулярной электроники**Роженко И. Н.¹, к. х. н., Федичкин Н. В.²**¹ ООО «ТД Химмед»

115230, г. Москва, Каширское ш., 3, стр. 4/9

² ООО «Научно-технический центр инноваций»

143026, г. Москва, ул. Нобеля (Сколково, Инновационный Центр Т, 7)

Рассмотрены созданные одномолекулярные пьезорезистивные датчики, кремний-молекулярно-кремниевые схемы, одномолекулярные мехатронные устройства, схемы, работающей на частотах ТГц, и био-хиро-спинтроника.

Ключевые слова: молекулярная электроника; датчики; фотоника; электроника ТГц; наноэлектроника; биоэлектроника.

Трансформация технологии производства одномолекулярных цепей на кремнии в прикладной метод, совместимый с существующими технологиями производства электронных схем [1, 2]: разработана новая технология синтеза диодов и транзисторов, позволяющая собирать молекулы между двумя кремниевыми электродами [1, 2] для наноэлектроники, фотоники и датчиков.

Открытие первого пьезорезистивного датчика — измерение электрического тока, проходящего через одиночную, изменяющую свою форму молекулу [3]: на современном уровне миниатюризации такие устройства имеют мм порядок. Наша разработка создает технологию с миниатюризацией датчиков давления до нм уровня, контролируемые изменения электропроводности одиночной молекулы в ответ на приложенную механическую силу и давление. Это позволяет разрабатывать миниатюрные (размером до 10 нм²) имплантируемые медицинские датчики давления и вибрационные датчики для электронной промышленности.

Одномолекулярные мехатронные устройства, работающие в качестве проводящего элемента в электронной схеме, имеют потенциал широкого применения в различных областях: молекулярной робототехнике, манипуляциях с одиночной молекулой для анализа на устройствах «лаборатория на чипе» и в наноразмерных устройствах сбора и преобразования энергии [4].

Молекулярная электроника, работающая на частотах ТГц, открывает возможности по использованию молекулярных контактов в антеннах, переключателях и датчиках в ТГц-диапазоне, а также в биомедицинской визуализации с высоким пространственным (нм) и временным (пс-фс) разрешением [5].

Биоэлектроника имеет чрезвычайную важность для живых организмов как интерфейс «мозг-внешняя среда», электроимпланты. Наша работа объединяет спинтроннику с ДНК электроникой: био-хиро-спинтроника [6].

Литература

1. Kosov D. S. et al. Spontaneous S–Si bonding of alkanethiols to Si(111)–H: towards Si–molecule–Si circuits // Chem. Sci., 2020. 11, 5246.
2. Kosov D. S. et al. Silicon — single molecule — silicon circuits // Chemical Science, 2021. 12, 15870.
3. Kosov D. S. et al. Controlling piezoresistance in single molecules through the isomerisation of bullvalenes // Nature Comm., 2023. 14, 6089.

4. Kosov D. S. et al. A physically realizable molecular motor driven by the Landauer blow-torch effect // *J. Chem. Phys.*, 2023. 158, 224106.
5. Kosov D. S. et al. Quantum transport in driven systems with vibrations: Floquet non-equilibrium Green's functions and the self-consistent Born approximation // *Phys. Rev. B*, 2023. 107, 035410.
6. Kosov D. S. et al. Chiral-induced-spin-selectivity of mechanical-motion-assisted spin polarisation and spin resolved current noise in dsDNA // *J. Chem. Phys.*, 2024 [In print].

УДК 621.382

Основные тенденции развития мировой микроэлектроники — 2024

Шелепин Н. А., д. т. н.*Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук
115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а, стр. 11
n.shelepin@list.ru*

В продолжение обзора мировой электроники, представленного на конференции 2022 года [1], продолжено рассмотрение основных тенденций развития полупроводниковых технологий и производств в 2023–2024 гг. Представлены данные об инвестициях и направлениях развития передовых микроэлектронных компаний и государственной поддержки микроэлектроники в США, Корею, Китае, Японии, на Тайване. Показано стремление компаний выиграть конкуренцию в части освоения технологического уровня 3 нм, которое было начато компанией Samsung в середине 2022 года и подхвачено TSMC в конце того же года, а также конкуренция анонсирования перехода на уровень 2 нм. Отмечено активное строительство новых фабрик на территории США, обеспеченное в значительной степени господдержкой в соответствии с законом «О чипах». В части развития технологий отмечено существенное увеличение значения передовых технологий трехмерной сборки.

Ключевые слова: технология; СБИС; FinFET; GAAFET.

Предварительные итоги 2023 года в сравнении с 2022

Представлены данные по выручке полупроводниковых компаний, опубликованные изданием Business Korea. Общий объем продаж составил 544,8 млрд долларов, что на 8,8% меньше, чем было в 2022 г. (597,662 млрд). Наибольшее падение случилось у крупнейших производителей памяти: Samsung Electronics –33,8%; SK Hynix –30,6%; Micron Technology –40,6%; KIOXIA Corporation –35,3%. В связи с этим Samsung спустя два года уступила первое место Intel, несмотря на то что выручка последней также упала на 15,8%. Естественно, самый потрясающий результат получен компанией NVIDIA: рост выручки на 133,6% (49,161 млрд долл.) и соответствующий подъем с восьмой строчки на вторую. Контрактные производители (Foundry) в данный рейтинг не входят.

Инвестиции и планы создания новых технологий и новых производств

Агентство Bloomberg опубликовало большую статью [2], в которой делается вывод, что «чипы стали новой нефтью в борьбе мировых держав за лидерство». Производство чипов остается нестабильным и эксклюзивным бизнесом. Сегодня передовые производственные технологии есть лишь у трех компаний в мире: тайваньской TSMC, южнокорейской Samsung и американской Intel. Последние годы характеризуются беспрецедентными объемами инвестиций, в том числе государственных, в развитие микроэлектроники практически во всех странах.

США выделили \$39 млрд для прямых инвестиций и \$75 млрд на льготные кредиты для местных полупроводниковых производителей. ЕС разработал собственный план с бюджетом \$46,3 млрд, совместно с частными инвестициями эта сумма, как ожидается, вырастет до \$108 млрд. К 2030 году Европа намеревается удвоить



объемы производства полупроводников и занять 20% мирового рынка. В феврале Индия выделила на эти же цели \$15 млрд. Объемы инвестиций Саудовской Аравии могут достичь \$100 млрд. Япония выделила \$25,3 млрд: TSMC построит в стране два завода, а местная Rapidus намеревается к 2027 году наладить производство логических чипов по технологии 2 нм.

В докладе рассмотрены и проанализированы действия корпораций и государств в области развития микроэлектроники США, Кореи, Китая, Японии, Тайваня и Европы. Отмечено, что мощнейшая финансовая поддержка США развития производств на своей территории дает ощутимые результаты. Начато создание новых фабрик не только американскими компаниями: и TSMC, и Samsung строят новые заводы с передовыми технологиями.

Рассмотрены результаты санкционной войны США против Китая в микроэлектронике и успехи китайских компаний в развитии новых технологий.

Что в перспективе?

Указанные три технологических лидера анонсируют в ближайшие годы переход на технологии уровня 2 нм. Отметим, что TSMC и Samsung уже ведут производство по технологическому уровню 3 нм, причем компания Samsung уже освоила технологию с GAAFET-транзисторами.

Литература

1. Шелепин Н.А. Особенности развития технологий и производств микроэлектроники в современных условиях // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-1 (119). — С. 155.
2. URL: <https://3dnews.ru/1105021/proizvodstvo-chipov-stalo-delom-pervostепенnoy-vagnosti-po-vsemu-miru?ysclid=lyga0ge52k921742687>.

УДК 621.3

Предварительный расчет и оценка влияния LER-эффекта при формировании ИС

Кульпинов М. С.¹, Калёнов А. Д.^{1,2}, Лосев В. В.¹¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*² *АО «НИИМА «Прогресс»**125183, г. Москва, пр. Черепановых, 54**kulpms@gmail.com*

В работе проанализированы основные причины возникновения неровностей фоторезистивной маски (LER-эффект), особенности переноса искажений маски в формируемые структуры, методы исследования шероховатости края линии маски и морфологии поверхности формируемых наноразмерных структур. Приведена модель стохастического прогнозирования, которая применяется для оценки исходов экспонирования фоторезиста.

Ключевые слова: неровности края линии фоторезиста; LER-эффект; фотонные интегральные схемы.

Существующие методы создания топологического рисунка в фоторезистивной маске приводят к образованию неровностей края линии и шероховатостей боковых стенок фоторезиста. Неровности края линии могут быть вызваны различными факторами в литографическом маршруте и зависят от выбранного типа литографии, выбранного типа фоторезиста, процессов травления, которые вносят неровности из-за неравномерной скорости травления.

Предварительная оценка неровностей фоторезистивной маски позволяет сделать прогнозы относительно параметров проектируемых элементов, что позволит учитывать возможные отклонения, возникающие в технологическом процессе при производстве нанoeлектронных устройств. По мнению авторов, основная проблема существующих моделей оценки LER-эффекта заключается в их высокой вычислительной сложности. В данном исследовании проанализирован аналитический метод оценки неровностей фоторезистивной маски для однородных шаблонов. В работе рассмотрена модель стохастического прогнозирования, которая применяется для оценки исходов экспонирования фоторезиста. Исследования показали, что LER-эффект вызывается серией стохастически изменяющихся эффектов. Полученные результаты, несмотря на их предварительный характер, дают положительное прогнозирование отклонения неровностей фоторезистивной маски от идеальной прямой при формировании трехмерных наноструктур интегральных схем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрауки РФ.

Соглашение № 075-03-2024-061 от 17.01.2024 г. Шифр FSMR-2023-0002.

Литература

1. Кульпинов М. С., Путря М. Г., Голишников А. А. Исследование влияния LER-эффекта на параметры фотонных интегральных схем // Материалы научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика — 2024»: Сборник статей. — М.: МИЭТ, 2024. — 236 с.



2. Kim I., Park S., Jeong C., Shim M. Simulator acceleration and inverse design of fin field-effect transistors using machine learning. *Scientific Reports*, 2022.
3. Kao M. Y., Kam H., Hu C. Deep-Learning-Assisted Physics-Driven MOSFET Current-Voltage Modeling // *IEEE Electron Device Letters*, 2022.

УДК 620.187.3

Определение геометрических параметров кластеров ксенона, образованных при имплантации монокристаллического кремния низкоэнергетичными ионами ксенона

Киреев Г. С.¹, Подорожний О. В.¹, Румянцев А. В.¹, Миннебаев Д. К.²,
Иешкин А. Е.², Богданова Н. А.¹, Боргардт Н. И.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
g.s.kireev@ya.ru

Работа посвящена определению размеров и формы кластеров ксенона, образующихся вблизи поверхности монокристалла кремния при облучении низкоэнергетичными ионами ксенона. Выявление кластеров проводилось методами просвечивающей растровой электронной микроскопии с применением цифровой обработки изображений. Определены параметрические модели, подходящие для аппроксимации распределения размеров кластеров.

Ключевые слова: ионная имплантация; просвечивающая растровая электронная микроскопия; аморфизация кремния; функция распределения по размерам; кластеры ксенона; цифровая обработка изображений.

Пучки ускоренных ионов инертных газов широко применяются в микро- и нанoeлектронике. Одним из наиболее важных направлений их применения является метод фокусированного ионного пучка, в котором с развитием плазменных источников ионов все большее распространение получают ионы ксенона Xe^+ [1], которые не взаимодействуют с материалом образца и при облучении, например, кремния Si образуют кластеры. Состояние обработанной ионным воздействием поверхности оказывает большое влияние на характеристики получаемых структур. Вследствие этого представляет большой интерес исследование облученного приповерхностного слоя образца, в том числе определение формы кластеров Хе и их распределение по размерам.

В настоящей работе с использованием методов просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) и цифровой обработки изображений охарактеризованы геометрические параметры кластеров ксенона в Si-подложке после облучения ионами Xe^+ с энергиями 8 кэВ. Микрофотографии получены на приборе FEI Titan Themis 200 при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Выявление кластеров Хе на ПРЭМ-изображениях затруднено из-за недостаточного контраста их границ и из-за неравномерной интенсивности фона (рис. 1а). Для проведения сегментации был модернизирован автоматизированный подход, использовавшийся в предыдущей работе [2] для изображений агломерированных наночастиц. Примененные в работе методы описаны в [3]. Сегментация изображений выполнялась методом морфологических водоразделов (ММВ). Для устранения присущей методу избыточной сегментации предложен способ определения маркеров, указывающих на положения кластеров.

Разработанный алгоритм определения маркеров включает в себя два основных этапа. На первом выполняется сглаживание исходного изображения и вычитание фона (рис. 1б) при помощи top-hat-фильтра и последующей морфологической



эрозии (МЭ) для улучшения видимости кластеров. Последующая бинаризация по методу Оцу позволяет получить изображение, содержащее светлые области в местах скопления кластеров. На втором этапе при помощи морфологического градиента визуализировались перепады интенсивности на границах кластеров. Сглаживание градиентного изображения и его бинаризация позволяют визуализировать границы. Маркерное изображение определяется как результат применения операции МЭ к разности бинаризованных изображений с этапов 1 и 2 соответственно, что позволяет разделить близко расположенные кластеры, но наиболее мелкие из них при этом удаляются. На финальном этапе ММВ применяется к сглаженному градиентному изображению, на котором поиск объектов интереса (кластеров) происходит только в областях, соответствующих найденным ранее маркерам.

Для характеристики размеров выявленных кластеров вычислялись диаметры кругов равной площади. Модальное значение и среднее квадратическое отклонение (СКО) составили 3,2 и 1,7 нм. Форма кластеров описывалась эксцентриситетами эквивалентных эллипсов с модой 0,58 и СКО 0,18, что говорит о заметном отклонении от круга, и коэффициентом выпуклости, равным отношению площади кластера к площади его выпуклой оболочки, с модой 0,970 и СКО 0,032, что говорит о высокой степени выпуклости.

Тип распределения кластеров по размерам определялся путем сравнения 15 различных параметрических моделей, параметры которых вычислялись по методу максимального правдоподобия. В качестве признака сравнения использовалось значение статистики критерия Колмогорова. Наиболее близкими являются распределения, схожие с логнормальным, такие как распределение Бура и обобщенное распределение экстремальных значений.

Таким образом, в работе предложен подход к цифровой обработке ПРЭМ-изображений кластеров Хе, основанный на операциях математической морфологии. С его помощью удалось описать форму и распределение размеров кластеров в приповерхностном слое Si, облученного ионами Хе⁺ с энергией 8 кэВ.

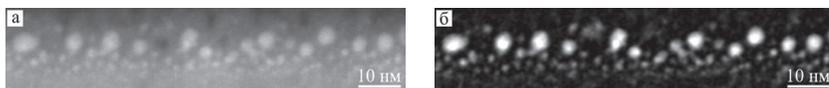


Рис. 1. ПРЭМ-изображение кластеров Хе до обработки (а) и после вычитания фона (б)

Работа выполнена в целях реализации программы развития НИУ МИЭТ в рамках программы государственной поддержки университетов РФ «Приоритет-2030» национального проекта «Наука и университеты».

Литература

1. Preiß E. I. et al. Applicability of focused Ion beam (FIB) milling with gallium, neo. and xenon to the fracture toughness characterization of gold thin films // Journal of Materials Research, 2021. Vol. 36. P. 2505–2514.
2. Киреев Г. С., Боргардт Н. И. Модификация метода морфологических водоразделов для сегментации РЭМ-изображений наночастиц РbTe // Микроэлектроника и информатика, 2023. — С. 137–145.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2012. — 1104 с.

УДК 548.522:539.23

Исследования структуры гетероперехода GaAs-SnAs-Sn

Бобылев М. А.¹, Ковалев В. И.¹, Каевицер Е. В.^{1,2}, Любченко В. Е.¹¹ Фрязинский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Исследована эпитаксиальная структура с металлическим типом проводимости GaAs-SnAs на подложках n+-GaAs и i-GaAs. SnAs имеет постоянную решетки, близкую к постоянной решетки GaAs. Данные гетероструктуры могут использоваться в качестве базового элемента генераторов и приемников электромагнитного излучения СВЧ- и КВЧ-диапазонов волн.

Ключевые слова: гетероструктура; GaAs-SnAs-Sn; диоды Шоттки; эпитаксия.

Параметры приборов в значительной степени зависят от свойств материалов и геометрии структур, что определяет возможности их использования в аппаратуре. В частности, диапазон рабочих частот диодов с барьером Шоттки ограничивается предельной частотой. Попытки увеличить предельную частоту путем уменьшения емкости барьера за счет уменьшения диаметра контакта приводят к увеличению последовательного сопротивления RS вследствие т.н. эффекта растекания тока. Этот эффект проявляется в случае, когда диаметр контакта меньше толщины подложки и вносит дополнительное сопротивление, обратно пропорциональное диаметру контакта и проводимости подложки. При этом для того, чтобы в едином процессе эпитаксиального роста получить достаточно совершенный n-слой, необходимо обеспечить согласование кристаллических решеток. Таким материалом, имеющим металлический тип проводимости и постоянную решетки, близкую к постоянной решетки арсенида галлия, является соединение SnAs.

Важным достоинством изучаемых структур GaAs-SnAs можно считать возможность управления свойствами этой системы за счет изменения геометрических размеров и атомно-молекулярной конфигурации объектов. Во-первых, эти материалы обладают совпадающими размерами параметров кристаллических решеток [3], во-вторых, низкие температуры плавления и практически совпадающие значения зависимости давления насыщенного пара от температуры предполагают идентичность поведения атомов компонентов при образовании растущего слоя при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) гетероперехода. И наконец, олово, как легирующий элемент в методе МЛЭ арсенида галлия, обладает склонностью к сегрегации растущей поверхностью.

В данной работе реализован послойный синтез стехиометрического арсенида олова с образованием кристаллов кубической сингонии, пространственная группа $Fm\bar{3}m$, с параметром ячейки $a = 0,5681$ нм, аналогичный механизм роста арсенида галлия. С другой стороны, из молекулярных пучков может формироваться и триарсенид тетраолова Sn_4As_3 , который образует кристаллы тригональной сингонии, пространственная группа $R\bar{3}m$, параметры ячейки $a = 1,223$ нм, $\alpha = 19,22^\circ$ (по другим данным, пространственная группа $R\bar{3}m$, параметры ячейки в гексагональной упаковке $a = 0,4089$ нм, $c = 3,6059$ нм [5]). Технология изготовления структур отличается от представленной ранее [1] тем, что процесс заканчивается осаждением



слоя олова толщиной 40–50 нм. Этот слой предохраняет гетеропереход от отравления кислородом при выносе в атмосферу. Резкость перехода и толщины слоев оценивались методами Оже-спектроскопии и спектральной эллипсометрии.

В зависимости от используемой подложки получаемая гетероструктура позволит существенно расширить функциональные возможности приборов, в частности диапазон рабочих частот диодов Шоттки, из-за возможности создания нового типа полевых транзисторов, в котором проводящий канал исток-сток создается не за счет слоя электронов с высокой подвижностью (HEMT), а за счет слоя с металлическим типом проводимости.

Литература

1. Белоусов П. С., Бобылев М. А., Ковалев В. И., Каевицер Е. В., Любченко В. Е., Руковишников А. И., Петров К. П., Пелипец О. В., Темиров Ю. Ш., Рогачев И. А. Синтез соединения SnAs в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2018. — № 4 (539). — С. 52–56.
2. Xu S. Y. et al. Discovery of a Weyl fermion semimetal and topological Fermi arcs // Science, 2015. № 349. P. 613–617.
3. Безотосный П. И., Дмитриева К. А., Гаврилкин С. Ю., Перваков К. С. и др. Исследование электронной зонной структуры сверхпроводника SnAs методом ARPES // Письма в ЖЭТФ, 2017. — Т. 106. — Вып. 8. — С. 493–495.
4. Айтхожин С. А. Подложка для выращивания эпитаксиальных слоев арсенида галлия: Патент РФ 2209260. — Публ. 27.07.2003.

УДК 621.3

Особенности конструкции и технологии производства кристаллов для кремниевой силовой ЭКБ

Романов Д. А.¹, Кравчук Е. А.¹, Чернышев Ю. П.¹, Быкова А. В.²,
к. т. н. Машевич П. Р.³

¹ ООО «СИТРОНИКС СМАРТ ТЕХНОЛОГИИ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2
dromanov@sitronics-smart.com

² АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Ключевые слова: Кремниевая силовая электронно-компонентная база (ЭКБ), IGBT транзисторы, FRD и FRED диоды, технология производства, особенности конструкции, Non Punch-Through (NPT), Soft Punch-Through (SPT).

Силовая ЭКБ является базовым элементом микроэлектроники, на которой построены большинство сложных электронных устройств, начиная от вычислительной и бытовой техники, автомобилей и заканчивая мощными энергетическими установками. Наибольшее влияние технологический уровень силовой ЭКБ оказывает в таких отраслях промышленности, как авиационная, автомобильная, машиностроительная, энергетическая, железнодорожная, судостроительная и оборонная. Основными областями применения силовой ЭКБ являются: современные высокоэффективные системы для электроэнергетики; энергосберегающее оборудование для промышленности; бортовое электрооборудование для авиации и космических аппаратов, надводных и подводных судов; электрооборудование для автомобильной промышленности, мощных самосвалов, экскаваторов, электромобилей; преобразовательное оборудование для импульсной и альтернативной энергетики (солнечная, ветровая, термоядерная, ЛТС); энергосберегающее оборудование для ЖКХ.

Уход основных поставщиков силовых модулей и транзисторов, таких как Infineon, Mitsubishi, Fuji, Semikron, Ixys, STMicroelectronics и др. создали дефицит в поставках и обслуживанию на рынке силовой электроники. Ряд компаний, которые использовали их продукцию, находятся в активном поиске альтернативных решений. Решающую роль в силовой ЭКБ занимает разработка конструкции и технологии производства современной кремниевой силовой электронно-компонентной базы (ЭКБ): полевых транзисторов типа «металл-оксид-полупроводник» (MOSFET транзисторы), биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT транзисторы), быстровосстанавливающихся диодов (FRD и FRED диоды), а также полупроводниковых модулей на основе MOSFET транзисторов, IGBT транзисторов и FRD и FRED диодов.

Рассмотрены особенности конструкции и технологии производства IGBT транзисторов, FRD и FRED диодов по технологии SPT (Soft Punch-Through) на напряжение от 1200 до 6500 В. Детально рассмотрены технологические операции формирования n⁺-буферного слоя и структуры обратной стороны по технологии

SPT, обеспечивающей уникальные характеристики IGBT транзисторов, FRD и FRED диодов, применяемых в кремниевой силовой ЭКБ.

Актуальность темы

В настоящее время приоритетными особенностями конструкции и технологиями производства современной кремниевой силовой ЭКБ являются: технология SPT+ IGBT на напряжение от 2500 до 6500 В и позволяющие достичь рабочие токи от 20 до 200 А; технология SPT+ Trench и RC SPT+ Trench IGBT на напряжение от 650 до 6500 В и позволяющие достичь рабочие токи от 20 до 200 А; технология SPT FRD с мягким переключением на напряжение от 650 до 6500 В и позволяющие достичь рабочие токи от 20 до 200 А. Важной задачей является определение приоритетных технологий, которые могут быть реализованы на существующих производственных мощностях и которые смогут обеспечить требуемые технические параметры конечного продукта для использования в критических областях промышленности и ВПК, осуществить импортозамещение.

Главной задачей является разработка и создание новой современной отечественной ЭКБ силовой кремниевой электроники, реализация которой позволит создать технологии производства полупроводниковых материалов и комплектующих с характеристиками, отвечающими современным и перспективным потребностям разработчиков радиоэлектронной продукции в интересах обороноспособности и безопасности государства.

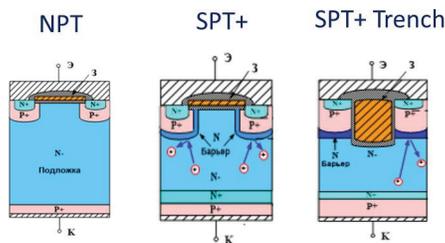


Рис. 1. Особенности конструкции и технологии производства кристаллов: NPT, SPT+, SPT+

Работы выполнены на оборудовании АО «Микрон».

УДК 621.3

Конструктивно-технологические особенности высоковольтных Trench IGBT-транзисторов

Быкова А. В.¹, Крицкая Т. Б.², к. т. н. Машевич П. Р.³

¹ АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валеева, 6/1
aevseeva@mikron.ru

² ООО «СИТРОНИКС СМАРТ ТЕХНОЛОГИИ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валеева, 6, стр. 2 2
tkritskaya@sitronics-smart.com

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
mashevich@ckp-miet.ru

Силовые IGBT модули нашли широкое применение в промышленности РФ в таких отраслях как атомная энергетика, авиационная и железнодорожная техника, добывающая промышленность и других важных стратегических для страны направлениях. На сегодняшний день основной элемент IGBT модуля — кристалл зарубежного производства. В условиях санкций остро встала проблема разработки и изготовления современных отечественных кристаллов IGBT на мощностях Российских предприятий. Единственной конструкцией в России, освоённой для выпуска в серийном производстве, являются силовые ключи с устаревшей технологией NPT (Non Punch-Through). Недостаток такой технологии — большая толщина подложки и, следовательно, большое напряжение насыщения открытого транзистора и увеличенные потери энергии при работе. Рассмотрена конструкции и технология изготовления кристаллов Trench SPT+ IGBT. Показаны преимущества такой конструкции и рассмотрены проблемы возникшие в процессе изготовления транзисторов.

Ключевые слова: IGBT транзисторы; Trench затвор; Non Punch-Through (NPT); Soft Punch-Through (SPT); моделирование; технология.

Актуальность темы

Актуальной задачей для развития отечественной силовой электроники является разработка транзисторов с технологией Trench IGBT — транзисторов с вертикальным затвором. Решение этой задачи позволит уменьшить площадь кристалла, снизить потери энергии при переключении, увеличить мощность тока на единицу площади кристалла.

Разработан и изготовлен новый тип кристалла IGBT, необходимый для производства современных силовых модулей — Trench IGBT, у которого структура затвора выполнена в виде глубокой канавки — Trench в теле подложки, и сформирован дополнительный n^+ -слой (Carried Stored n layer), ограничивающий количество дырок инжектируемых из p^+ -слоя. Такая конструкция позволяет улучшить электрофизические, динамические параметры силовых ключей и одновременно уменьшить размер кристаллов.

Структура Trench IGBT имеет вертикальный затвор, который помещен в «канавку» (Trench). Глубина формируемой канавки от 4 до 6 мкм, а ширина от 0,7 до 1,5 мкм. Формирование такого затвора имеет ряд особенностей:

- канавки должны быть с «положительным углом» наклона, гладкими стенками и скругленным доньшком,
- в канавке должен быть сформирован качественный подзатворный диэлектрик,
- необходимо полное заполнение канавки поликристаллическим кремнием, равномерно легированным в области канала транзистора

На рис. 1 представлена технологическая расчетная модель (а) и скол структуры (б) Trench IGBT на образце.

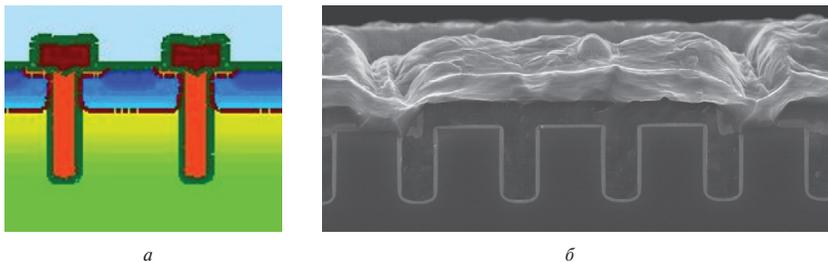


Рис. 1. Конструкция Trench IGBT: модель (а), скол (б)

Работы выполнены на оборудовании АО «Микрон». На предприятии АО Микрон разработаны первые опытные образцы IGBT Trench транзисторов, изготовленные на кремниевых пластинах диаметром 150 мм.

УДК 621.389

Современные возможности толстопленочной технологии

Адарчин С. А., к. т. н., Мишенев Р. А., Гурин В. М.

ООО «ФОКОН»

248035, г. Калуга, Грабцевское ш., 73, пом. 7

adarchin@fokon.net

Описаны физические свойства с способ формирования электронных компонентов методом толстопленочной технологии.

Ключевые слова: толстопленочная технология; гибридная интегральная схема.

Толстопленочную технологию, позволяющую получать пленки толщиной от единиц до нескольких десятков микрометров традиционно применяют для изготовления пассивных элементов: резисторов, конденсаторов, проводников, контактов плат гибридных интегральных микросхем, а также проводников и изолирующих слоев в некоторых типах многоуровневых металлокерамических печатных платах, в частности в СВЧ, силовой и автомобильной электронике.

На сегодняшний день толстопленочная технология имеет большой спрос в производстве интегральных микросхем. Ее достоинство — использование недорогих, но высокопроизводительных процессов. Для формирования конфигурации пленочных элементов используется трафаретный способ печати паст специального состава.

Нанесение паст проводят двумя способами: бесконтактным и контактным. Для устранения неравномерности толщины резисторов рекомендуется составлять топологию так, чтобы все резисторы располагались по длине в одном направлении по движению ракеля. По этой же причине не рекомендуется проектировать длинные и узкие, а также короткие и широкие резисторы [1].

Двухсторонние и многослойные платы гибридных интегральных микросхем с металлизированными отверстиями находят широкое применение как для создания 3-D систем, так и многокристальных модулей, такие микроэлектронные системы являются наиболее сложным воплощением толстопленочной технологии. В этом случае толстопленочная технология обеспечивает многоуровневые межкристалльные соединения и обвязку с использованием как прямого монтажа кристалла, так и flip-chip в одной системе.

Стремительное развитие электронной промышленности в целом и необходимость в оперативном изготовлении широкой номенклатуры пассивных электронных компонентов обуславливают повышенный интерес к толстопленочной технологии.

Литература

1. Красов В. Г., Петаускас Г. Б., Чернозубов Ю. С. Толстопленочная технология в СВЧ микроэлектронике. — М.: Радио и связь, 1985. — С. 98–103.
2. Методы изготовления толстых пленок с помощью электролитического и химического осаждения. — URL: https://studopedia.ru/3_207134_metodi-izgotovleniya-tolstih-plenok-s-pomoshchyu-elektroliticheskogo-i-himicheskogo-osazhdeniya.html.



УДК 621

Необходимость, возможности и способы преодоления хронической болезни российской микроэлектроники: низкого выхода годных, проблем надежности и улучшения характеристик изготавливаемых приборов

Ковешников С. В.¹, Солтанович О. А.¹, Мордкович Е. А.²

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и обособленных материалов РАН*

*142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
skoveshnikov@iptm.ru*

² *ООО «Остек-Электро»*

*121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2
Mordkovich.E@ostec-group.ru*

Загрязнение пластин кремния примесями металлов в процессе изготовления приборов микроэлектроники приводит к резкому уменьшению процента выхода годных, деградации надежности и ухудшению электрических характеристик КМОП-транзисторов. Примеси металлов, загрязнение которыми может также происходить в процессе роста слитков кремния и в процессе изготовления пластин, способны влиять на концентрацию, подвижность и время жизни носителей заряда. Первым важным шагом для устранения влияния металлических примесей является их обнаружение и идентификация как аналитическими, так и электрофизическими методами. Вторым важным шагом является внедрение методов контроля исходных пластин кремния и используемых технологических процессов. И наконец, внедрение процессов геттерирования в технологический процесс позволит добиться увеличения выхода годных, повышения надежности и улучшения характеристик российских микроэлектронных приборов.

Ключевые слова: пластины кремния; КМОП-транзисторы; металлические примеси; электрофизические методы; геттерирование.

Структуры металл-оксид-полупроводник (МОП) на основе SiO_2/Si являются базовым элементом в современной микроэлектронике и имеют широкую область применений. В частности, они используются при изготовлении нормально закрытых МОП-транзисторов, в которых перенос тока обеспечивается неосновными носителями, создающими инверсионный канал в режиме сильного обеднения МОП структуры. Важнейшие параметры транзисторов, такие как подвижность носителей, быстродействие и т. д., в решающей степени определяются свойствами образующегося инверсного слоя. При этом, на процессы формирования инверсного слоя и скорость его отклика на изменение приложенного напряжения могут оказывать влияние заряды в диэлектрике, поверхностные состояния на границе раздела диэлектрик-полупроводник, а также процессы генерации-рекомбинации носителей в приповерхностной области полупроводника.

В настоящей работе проведены измерения характеристик n-канальных МОП-транзисторов, полученных от нескольких российских производителей микроэлектронных приборов. Измерения вольт-амперных характеристик выявили проблемы

с надежностью в процессе электро-стресса (приложения напряжений обеих полярностей разной длительности). Для изучения механизмов деградации транзисторных характеристик методом вольт-фарадных характеристик (ВФХ) исследованы коммерческие МОП-структуры Al/SiO₂/p-Si с толщиной диэлектрика 90–120 нм и концентрацией легирующей примеси бора $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Структуры подвергались электро-стрессу с последующими измерениями ВФХ с помощью параметрического анализатора Keithley 4200A-SCS. Большие напряжения, приложенные к структуре в режиме обогащения, приводят к существенному увеличению времени формирования инверсного слоя и времени его отклика на изменение приложенного напряжения. С увеличением времени электро-стресса вид ВФХ меняется от низкочастотной к высокочастотной, а затем — к ВФХ глубокого обеднения, что свидетельствует об увеличении времени отклика инверсного слоя, а также увеличении времени его формирования при более длительном воздействии отрицательного напряжения. Полученные результаты могут объяснены загрязнением кремния быстродиффундирующими примесями. Проведенный анализ показал, что роль такой примеси играют положительно заряженные ионы меди, взаимодействующие как с глубокими акцепторными центрами. Наличие меди в исследованных пластинах подтвердилось методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии с полным внешним отражением на пластинах с тонким геттерирующим слоем. Для устранения нежелательного воздействия воздействия быстродиффундирующих примесей металлов (медь, никель, железо и др.) нами предложено внедрение в технологический процесс методов внутреннего и внешнего геттерирования.



УДК 621.3.049.77

Методики практического определения составляющих дозовой ошибки в проекционной фотолитографии

Балан Н. Н., к. т. н., Васин А. А., Иванов В. В., к. ф.-м. н., Панкратов А. Л.
АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
nbalan@niime.ru

В работе описываются средства и методики, необходимые для реализации способа практической оценки составляющих дозовой ошибки литографического процесса.

Ключевые слова: проекционная фотолитография; ошибки дозы и фокуса; аттестационный фотошаблон.

В технологии производства интегральных схем литография всегда занимала одно из главных мест [1], в настоящее время ситуация в этой области еще более острая — современные установки проекционной фотолитографии весьма сложны и дороги, а требования к фотошаблонам (ФШ) существенно возросли [2].

Литографический процесс включает в себя множество последовательных этапов, таких как нанесение фоторезиста, температурная обработка, экспонирование, постэкспозиционная температурная обработка, проявление и т. д. Каждый из этих этапов является источником погрешностей дозы или фокуса [3].

Внесение изменений в литографический процесс (например вынужденная замена материалов или каких-либо узлов установок экспонирования и обработки резиста) влечет необходимость пересмотра требований, предъявляемых к используемым фотошаблонам (в силу возможного изменения значения дозовой ошибки, вносимой на том или ином этапе литографического процесса). В силу актуальности этой проблемы для отечественного полупроводникового производства в настоящее время представляется целесообразным привлечение средств и методов, позволяющих в подобных ситуациях производить практическую оценку изменившихся составляющих дозовой ошибки, а также новых требований к литографическим инструментам во избежание уменьшения выхода годных, обусловленного внесенными в процесс изменениями.

В настоящей работе описываются возможные методики определения составляющих дозовой ошибки процесса проекционной фотолитографии с использованием специализированных аттестационных фотошаблонов, организованных по принципу «Picked-CD» [4, 5] и содержащих топологические структуры, характерные для рассматриваемых литографических операций. Предложены схемы отъема аттестационных фотошаблонов и составления тестовых выборок, позволяющие выделить компоненты дозовой ошибки, соответствующие тому или иному ее источнику (качество рисунка на фотошаблоне, неравномерность освещения, неравномерность термообработки пластин и др.).

Полученные таким образом результаты в совокупности с данными, снимаемыми с контрольно-измерительных устройств литографической установки, дадут возможность произвести оценку основных составляющих относительной дозовой ошибки литографического процесса.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: Часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69. EDN YQYYZB.
2. Балан Н. Н., Жаворонкин Ю. Г., Иванов В. В. и др. Система требований к фотошаблонам для проекционной фотолитографии, применяемым в производстве полупроводниковых изделий современных проектных норм // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-1(119). — С. 122–131. DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.122.131. EDN RGGHRG.
3. Mack C. A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. New York: John Wiley and Sons, 2007. 528 p. DOI: 10.1002/9780470723876.
4. Waelpoel J. A. C., van Schoot J. B. P., Zanzal A. G. Demonstrating next-generation CD uniformity with today's tools and processes // 17th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management / eds. J. A. Reynolds, B. J. Grenon. SPIE, 1997. Vol. 3236. P. 275–283. DOI: 10.1117/12.301228.
5. Kiers T., Mulder M. et al. Reticle error correction for lithography tool qualification benefits and limitations // 20th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology / eds. B. J. Grenon, G. T. Dao. SPIE, 2001. Vol. 4186. P. 217–226. DOI: 10.1117/12.410696.



УДК 621.3.049.77

Возможности повышения разрешающей способности стандартных процессов проекционной фотолитографии за счет фотошаблонов

Балан Н. Н., к. т. н., Иванов В. В., к. ф.-м. н., Панкратов А. Л.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

nbalan@niime.ru

В работе делается оценка возможностей повышения качества литографического процесса за счет применения специализированных фотошаблонов. Рассматриваются примеры типовых процессов и оборудования, применяемых для проекционного переноса критических слоев технологий проектных норм 250, 180 и 90 нм.

Ключевые слова: проекционная фотолитография; фотошаблон; повышение разрешающей способности; техники RET.

Развитие технологии производства изделий микро- и нанoeлектроники во многом зависит от возможностей проекционной фотолитографии [1], которые в свою очередь определяются множеством факторов — длиной волны экспонирующего излучения, возможностями проекционной системы, применяемыми методиками RET [2, 3]. Важную роль играют также дозовые и фокусные погрешности процесса, источником которых выступают используемые инструменты и материалы.

Геометрия фоторезистивной маски на пластине должна удовлетворять ряду требований, предъявляемых к минимальному полупериоду, формируемого в фоторезисте рисунка, допускам на размер элемента фоторезистивной маски при необходимой глубине фокуса, а также к точности совмещения [4].

В обычной практике для определенного уровня технологии применяется стандартный набор материалов, оборудования и фотошаблонов, параметры которых позволяют создать на пластине необходимый рисунок. Однако, в ряде случаев при разработке технологических процессов возникают специфические задачи (связанные, например, с необходимостью введения в технологию новых критических слоев), предъявляющие к возможностям литографии повышенные требования, при этом замена литографического оборудования нежелательна или невозможна.

Используемые в проекционной фотолитографии фотошаблоны так же, как и остальные элементы процесса проекционного переноса изображения на пластину, являются источником дозовых и фокусных погрешностей, которые возможно минимизировать. Кроме того, фотошаблоны имеют существенный потенциал для увеличения контраста воздушного изображения (при использовании фазового сдвига и непропечатываемых вспомогательных элементов рисунка), а следовательно — повышения качества литографического процесса.

В настоящей работе на основе ряда модельных экспериментов делается оценка возможностей повышения качества литографического процесса за счет использования специализированных фотошаблонов. Рассматриваются типовое оборудование и процессы, применяемые для проекционного переноса критических слоев технологий проектных норм 250, 180 и 90 нм.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: Часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69. EDN YQYYZB.
2. Mack C. A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. New York: John Wiley and Sons, 2007. 528 p. DOI: 10.1002/9780470723876.
3. Lin B. J. Optical Lithography: Here is Why, Second Edition. SPIE Press, 2021. 580 p. DOI: 10.1117/3.2586123.
4. Балан Н. Н., Жаворонкин Ю. Г., Иванов В. В. и др. Система требований к фототабламам для проекционной фотолитографии, применяемым в производстве полупроводниковых изделий современных проектных норм // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-1 (119). — С. 122–131. DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.122.131. EDN RGGHRG.



УДК 621.3.049.771.14

Разработка мультипроектных пластин

Лукошко Г. К., к. т. н., Нартов С. И., Пашкова И. В., Чамова А. В.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

glukoshko@niime.ru

В работе рассмотрены вопросы разработки мультипроектных пластин по отечественным технологиям.

Ключевые слова: технология; микроэлектроника; пластины.

Одним из направлений работ АО «НИИМЭ» является выполнение работ по разработке мультипроектных пластин по заказам российских центров проектирования микросхем на изготовление кристаллов в режиме foundry по отечественным технологиям [1–2].

Для проектирования кристаллов разработчикам микросхем предоставляется доступ к комплектам средств проектирования (PDK), библиотекам элементов, и заключаются лицензионные договоры на использование IP-блоков. Разработчики микросхем передают в АО «НИИМЭ» топологию разработанных кристаллов. Полученная топология проходит проверку на соответствие правилам проектирования (DRC — Design Rule Check) в целях недопущения запуска в изготовление мультипроектных пластин кристаллов с топологией, не соответствующей актуальным правилам проектирования (DRM) для базовой технологии. После проверки топологии разрабатывается эскиз кадра фотошаблона. Эскиз содержит информацию о расположении всех кристаллов и параметрического монитора. Особенностью мультипроектных пластин является то, что они содержат несколько кристаллов, разработанных разными дизайн-центрами, при этом в определенных случаях допускается расположение в кадре фотошаблона кристаллов, спроектированных с учетом разных технологических опций. Разработка управляющей информации для изготовления фотошаблонов включает формирование кадра изображения фотошаблона в графическом виде: размещение кристаллов и параметрического монитора, размещение знаков базирования для установки, маркировку ФШ, штрих кода, а также другой служебной информации. После формирования кадра проводится разработка управляющей информации (УИ) для изготовления фотошаблонов, архивирование и передача УИ изготовителю ФШ, а также разработка документации для изготовления мультипроектных пластин.

Изготовление пластин осуществляется по разработанной технологической документации, на завершающей стадии изготовления проводится контроль значений параметров тестовых элементов параметрического монитора, утонение пластин (при необходимости), проверка внешнего вида. После завершения изготовления пластин проводится резка пластин на кристаллы и передача кристаллов Заказчикам.

Литература

1. Шелепин Н. А., Игнатов П. В., Лукошко Г. К., Шипицин Д. С. Возможности и перспективы контрактной разработки и производства кремниевой микроэлектроники на российской полупроводниковой фабрике // Электронная

компонентная база и микроэлектронные модули: сборник тезисов научной конференции Форума Микроэлектроника-2021 (г. Алушта, Республика Крым, 03–09 октября 2021) // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 354–355. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.354.355. EDN EWSSTV.

2. Лукошко Г. К., Депутатов Д. А., Жаворонкин Ю. Г. и др. Разработка пластин с кристаллами заказанных элементов // Российский форум микроэлектроника 2023: Сборник тезисов 9-й Научной конференции, Москва, 09–14 октября 2023 года. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. — С. 211–212. EDN JHWYAF.



УДК 537.226.4

Управление структурой HZO и функциональными свойствами сегнетоэлектрических ячеек памяти на его основе путем легирования и модификации границ раздела

К. ф.-м. н. Черникова А. Г., Забросаев И. В., Сизых Н. А., к. ф.-м. н. Ислам К., д. т. н. Маркеев А. М.

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
chernikova.ag@mipt.ru*

В данной работе обсуждается влияние ультратонких диэлектрических вставок TiO_2 (~1,5 нм) на границах раздела между TiN электродами и тонкопленочным сегнетоэлектриком $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ и легирующей примеси (La) на структуру $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$, ресурс переключений и эффективность хранения записанных состояний в $\text{TiN}/\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2/\text{TiN}$ сегнетоэлектрических конденсаторах, сформированных по полностью КМОП-совместимой технологии. Одновременное применение данных подходов потенциально может быть использовано для решения проблем на пути реализации энергонезависимой FeRAM-памяти на основе $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики; сегнетоэлектрическая память; оксид гафния; оксид циркония; $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$; легирование; TiO_2 ; атомно-слоевое осаждение.

В 2011–2012 годах были впервые обнаружены сегнетоэлектрические (СЭ) свойства у тонкопленочного оксида гафния (HfO_2) и смешанного оксида гафния и циркония ($\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$, HZO) [1, 2]. Несмотря на огромный интерес научного сообщества к данному открытию, обусловленный в первую очередь, перспективой использования HZO в памяти произвольного доступа (FeRAM), и последовавшие за этим открытием активные исследования его структурных и функциональных свойств, до сих пор существуют проблемы с практической реализацией FeRAM на основе HZO. Дело в том, что, несмотря на технологическую совместимость со всеми процессами производства интегральных микросхем и приемлемую для внедрения в устройства памяти величину остаточной поляризации (P_r), СЭ конденсаторы на основе HZO демонстрируют проблемы со стабильностью переключений. В частности, оказывается ограниченным ресурс переключений поляризации, что с практической точки зрения означает ограничение по числу циклов чтения/записи ячейки FeRAM. Кроме того, наблюдаются проблемы с долговременным хранением записанных состояний при повышенной температуре. Дело в том, что длительное хранение каждого из состояний поляризации приводит к смещению СЭ петель гистерезиса в одном из направлений электрического поля (так называемый, импринт), в результате чего становится невозможным перезаписывать состояния всех СЭ доменов с использованием фиксированных амплитуд импульсов напряжения [3]. С практической точки зрения, эта проблема неотделима от полной или частичной потери записанного состояния вследствие деполяризации, поскольку чтение и запись представляют собой единый процесс в FeRAM.

Вместе с тем, многочисленные исследования последних лет, показали, что существуют способы управления структурными и электрофизическими свойствами HZO. В частности, нами могут быть выделены два подхода, которые показали себя наиболее перспективными для решения вышеобозначенных проблем. Первый подход связан с прецизионным легированием HZO лантаном (La) на уровне нескольких мол. % (в пересчете на La_2O_3). В ряде работ было показано, что La снижает величину токов утечки через HZO и существенно увеличивает ресурс переключений за счет снижения концентрации кислородных вакансий в HZO [4]. При этом низкие концентрации La способствуют также увеличению P_r за счет подавления образования неполярной моноклинной фазы в HZO, не приводя к увеличению температуры кристаллизации HZO. Второй подход связан с модификацией границ раздела между HZO и TiN электродом путем внедрения тонких диэлектрических вставок. В [5] было показано, что формирование ультратонких слоев TiO_2 на нижней границе раздела способствует уменьшению импринта, что приводит к существенному улучшению характеристик хранения. По всей видимости, это связано с ослаблением электрического и химического взаимодействия между HZO и TiN, вследствие чего уменьшается концентрация электрически-активных дефектов и снижается вероятность захвата заряда на дефекты в процессе хранения. Вместе с тем, влияние каждого из подходов на весь комплекс функциональных свойств ячейки памяти неоднозначно. В ряде работ сообщается, что добавка La способствует появлению эффекта объемной деполяризации, что в конечном счете негативно сказывается на хранении [6], а ультратонкие вставки TiO_2 могут ухудшать ресурс переключений [5]. Таким образом, ни один из данных подходов в отдельности не может решить весь комплекс обозначенных проблем.

В этой связи, в данной работе была исследована возможность объединения двух вышеописанных подходов для одновременного улучшения ресурса и эффективности долговременного хранения состояний СЭ конденсаторов, создаваемых по полностью совместимой с процессами формирования FeRAM ячеек технологии, включающей в себя формирование всех функциональных слоев методом атомно-слоевого осаждения (АСО). Кроме того, отдельное внимание было уделено тому, можно ли получить дополнительное улучшение характеристик хранения путем модификации ультратонкой АСО-вставкой TiO_2 не только нижней, но и верхней границы раздела между TiN и HZO.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда
(проект № 23-19-00227, <https://rscf.ru/project/23-19-00227>).*

Литература

1. Böске T. S., Müller J., Bräuhaus D., Schröder U., Böttger U. Ferroelectricity in Hafnium Oxide Thin Films // Appl. Phys. Lett., 2011. 99, 102903.
2. Müller J., Böске T. S., Schröder U., Mueller S., Bräuhaus D., Böttger U., Frey L., Mikolajick T. Ferroelectricity in Simple Binary ZrO_2 and HfO_2 // Nano Lett., 2012. 12, 4318–4323.
3. Chernikova A. G., Markeev A. M. Dynamic imprint recovery as an origin of the pulse width dependence of retention in $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ -based capacitors // Appl. Phys. Lett., 2021. 119, 032904.



4. Kozodaev M. G., Chernikova A. G., Korostylev E. V., Park M. H., Khakimov R. R., Hwang C. S., Markeev A. M. Mitigating wakeup effect and improving endurance of ferroelectric $\text{HfO}_2\text{-ZrO}_2$ thin films by careful La-doping // *J. Appl. Phys.*, 2019. 125, 034101.
5. Koroleva A. A., Chernikova A. G., Zarubin S. S., Korostylev E. V., Khakimov R. R., Zhuk M. Yu., Markeev A. M. Retention Improvement of HZO-Based Ferroelectric Capacitors with TiO_2 Insets // *ACS Omega* 2022. 7 (50). 47084–47095.
6. Mehmood F., Hoffmann M., Lomenzo P. D., Richter C., Materano M., Mikolajick T., Schroeder U. Bulk Depolarization Fields as a Major Contributor to the Ferroelectric Reliability Performance in Lanthanum Doped $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ Capacitors // *Adv. Mater. Interfaces*, 2019. 6, 1901180.

УДК 621.3.049.77

Технология глубокого направленного плазмохимического травления кремния в смешанном режиме

К. т. н., Осипов А. А., Фумина А. Е., к. т. н., Спешилова А. Б., Ендиярова Е. В., д. х. н., Александров С. Е.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
tema.osipov@mail.ru*

Создана установка плазмохимического травления различных материалов электронной техники и на основе этой установки была разработана технология направленного глубокого плазмохимического травления кремния в смешанном режиме.

Ключевые слова: кремний; ПХТ; плазма; травление.

В последние годы наряду с дальнейшей миниатюризацией изделий микроэлектроники растет спрос на повышение их функциональности с точки зрения интеграции сформированных по отдельности электронных, микромеханических, оптических и других систем в единое устройство [1]. Ключом к решению данной задачи стала технология трехмерной сборки, которая позволила при сохранении минимальных размеров и максимального быстродействия обеспечить гетерогенную интеграцию, другими словами, объединение в одно устройство компонентов, изготовленных с использованием различных технологических процессов и материалов [2, 3]. Вертикальная система интеграции подразумевает под собой формирование сквозных структур в кремнии (Si) и последующим осаждением на их поверхность различных функциональных слоев [4]. Такой подход не только обеспечил максимально возможный на сегодняшний день уровень интеграции элементов, но также позволил значительно сократить время передачи сигнала и паразитные помехи за счет уменьшения длины межсоединений по сравнению с плоскими контактами и выводами в микросхемах [5].

Существует ряд критических требований, предъявляемых к кремниевым структурам, используемым для формирования вертикальных сквозных соединений. В первую очередь, к ним относится строгий контроль размеров и геометрии получаемых структур, а также минимальная шероховатость их поверхности, так как это непосредственно влияет не только на последующие процессы заполнения структур проводящим металлом, но и приводит к ограничениям возможного дальнейшего масштабирования [6]. В связи с этим, наиболее подходящим процессом для формирования микроструктур подобного рода может считаться смешанное плазмохимическое травление (ПХТ) Si при комнатной температуре. Преимуществами такого процесса перед классическим циклическим Bosch процессом являются простота оборудования, а также отсутствие чередующихся стадий травления и пассивации, что положительно сказывается на шероховатости стенок получаемых структур [7].

Эксперименты выполнены на оригинальной установке плазмохимического травления с источником индуктивно связанной плазмы (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид созданной установки ПХТ и 3D-модель реактора установки ПХТ

Травление проводилось в смеси газов SF_6/C_4F_8 . Гексафторид серы повышенной чистоты использовался в качестве основного газа-травителя, а октафторциклобутан в качестве газа-ингибитора.

Результаты глубокого направленного ПХТ травления Si в смешанном режиме представлены на рис. 2.

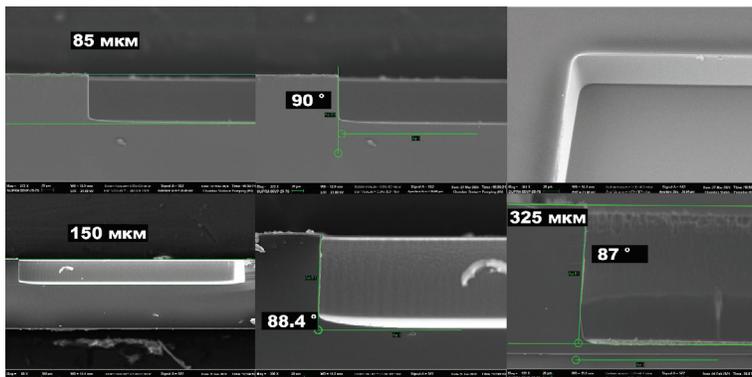


Рис. 2. Микрофотографии полученных в результате процесса ПХТ структур

Разработанная технология ПХТ кремния позволяет получать структуры глубиной более 300 мкм с углом наклона стенки профиля травления $\sim 87^\circ$, скорость травления от 0,5 до 1 мкм/мин с селективностью по отношению к фоторезисту от 25 до 35.

Литература

1. Karnausenko D. et al. 3D self-assembled microelectronic devices: concepts, materials, applications // *Advanced Materials*, 2020. Vol. 32. № 15. P. 1902994.
2. Guo X., Xue Z., Zhang Y. Manufacturing of 3D multifunctional microelectronic devices: challenges and opportunities // *NPG Asia Materials*, 2019. Vol. 11. № 1. P. 29.

3. Lee W. et al. Two-dimensional materials in functional three-dimensional architectures with applications in photodetection and imaging // *Nature communications*, 2018. Vol. 9. № 1. P. 1417.
4. Shen W. W., Chen K. N. Three-Dimensional Integrated Circuit (3D IC) Key Technology: Through-Silicon Via (TSV) // *Nanoscale Res. Lett.*, 2017. 12, 56.
5. Chandrakar S., Gupta D., Majumder M. K. Role of through silicon via in 3D integration: Impact on delay and power // *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2021. Vol. 30. № 03. P. 2150051.
6. Werbaneth P. TSV ETCHING // *3D Integration for VLSI Systems*, 2016. P. 71.
7. Laermer F. et al. Deep reactive ion etching. Chapter 16 // *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies*. Elsevier, 2020. P. 417–446.

УДК 621.316.8:621.793.8 + 621.382

Непроволочные пиротехнические воспламенители с эффектом СВС для развертывания автомобильных подушек безопасности

Корж И. А., к. т. н., Чуклин В. А.

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»

644009, г. Омск, ул. Масленникова, 231

trs@oniip.ru, otdel13@oniip.ru

Представлен краткий обзор работ, посвященных исследованиям и разработкам непроволочных пиротехнических воспламенителей с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), предназначенных для развертывания автомобильных подушек безопасности. Рассмотрено несколько конструктивов воспламенителей с различными вариантами формирования резистивных мостиков в сочетании с СВС нанопленками. Приведены результаты разработки воспламенителей на основе нанопленок Al/Ni.

Ключевые слова: непроволочный пиротехнический энергетический воспламенитель; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; нанопленки Al/Ni; автомобильные подушки безопасности.

Подушки безопасности (airbag) представляют собой систему, в которую входят газогенератор с подушкой в одном узле, датчики удара, а в самых современных и электронный блок управления. В газогенераторе, называемом часто пиропатроном, используется твердое топливо, при сгорании которого выделяется газ, заполняющий, а точнее, надувающий подушку. Топливом обычно выступает ядовитый азид натрия (NaN_3), 45% массы которого при сгорании превращается в чистый азот, а остальное — в углекислый газ (CO_2), окись углерода (CO), воду (H_2O) и твердые частицы. Хотя процесс сгорания и происходит быстро, он не носит взрывного характера. Оптимальное для обеспечения «надувательства» время наполнения подушки — 30–55 миллисекунд. Газ в подушку поступает через специальный фильтр, который пропускает только азот. В развернутом состоянии подушка находится очень короткое время (до 1 с), так как азот (абсолютно безопасный для человека) через специальные отверстия быстро выходит в салон, чтобы подушка не задушила защищаемого пассажира. В качестве топлива некоторые производители подушек безопасности применяют нитроцеллюлозу. Для разворачивания airbag его требуется значительно меньше (8 г), чем азид натрия (50 г). При этом также не требуется установка фильтра.

На рис. 1 показано устройство для подушек безопасности в котором газ для накачивания подушек образуется от сгорания топлива.

На рис. 2 показана конструкция устройства, в которой газ (аргон, гелий) находится в специальном баллоне под высоким давлением.

Основным элементом устройства является пиропатрон-пиротехнический воспламенитель для приведения в действие пиротехнических зарядов. В устройствах для развертывания подушек безопасности обычно используются электровоспламенители со взрывающимся проволочным мостиком. На рис. 3 приведена схема такого воспламенителя.

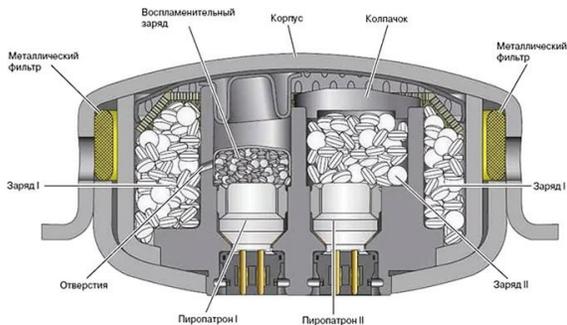


Рис. 1. Конструкция устройства для подушек безопасности

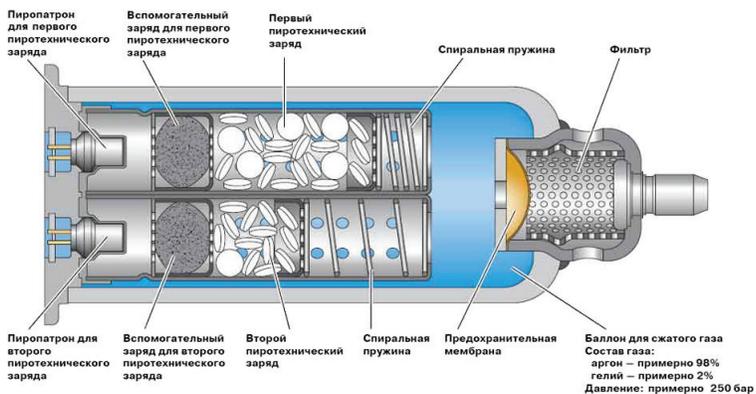


Рис. 2. Конструкция устройства с газом в баллоне

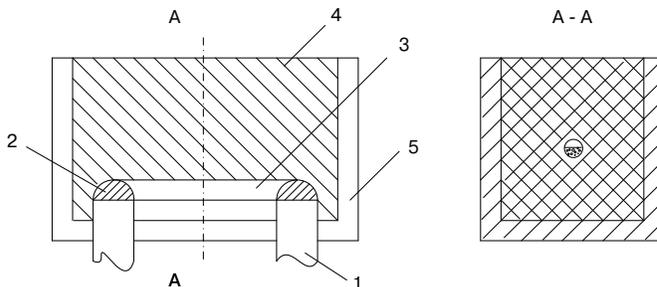


Рис. 3. Схема электровоспламенителя со взрывающимся мостиком:
1 – электроды; 2 – спайка; 3 – мостик; 4 – ПС; 5 – корпус

В качестве пиротехнического состава (ПС) в таких воспламенителях широко используется состав: перхлорат калия $KClO_4$ — 60 %, алюминий (нанопорошок) — 40 %. Состав обладает следующими характеристиками: температура горения более 5000°C , выделяемая энергия до 10000 Дж/г.

Недостатками пиротехнического воспламенителя с резистивным проволочным мостиком являются:

- относительно большое время инициирования (десятьки миллисекунд) и при больших скоростях движения автомобиля оно может быть недостаточным для успешного срабатывания подушки безопасности;
- малая площадь соприкосновения резистивного мостика с частицами пиротехнического состава.

Нами проводятся работы по резкому уменьшению времени инициирования за счет использования конструкции воспламенителя с тонкопленочным резистивным мостиком и энергетической многослойной пленки с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Эффект СВС заключается в следующем. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС процесс) — впервые это явление было открыто более 50 лет назад академиком М. Г. Мерзжановым. Вначале СВС процесс осуществлялся на нанопорошках, но в последние годы за рубежом интенсивно стало развиваться направление, связанное с созданием многослойной энергетической нанофольги с использованием магнетронного распыления материалов. Поочередно на вращающуюся подложку напыляются нанослои (например алюминия и никеля) — толщина каждого из чередующихся слоев 30–50 нм. Общая толщина фольги 40–80 мкм. При воздействии на край фольги локального импульса энергии (от источника постоянного тока 3–5 В или от пятна лазерного излучения) происходит вспышка фольги и по ее площади распространяется так называемый фронт безгазового горения со скоростью 2–10 м/с. Температура фольги повышается до 1500 – 1600°C в течении микросекунд с выделением значительного количества тепла (см. рис. 4). Для горения фольги не требуется кислород. Она воспламеняется в вакууме, воде и т. п.



Рис. 4. Вспышка СВС фольги

Разработано два типа воспламенителей. Первый тип — в качестве резистивного мостика используются пленки типа тантала (Ta), нитрида тантала (TaN) и титана (Ti). Второй тип — в качестве резистивного мостика используется мостик из СВС пленки типа Al/Ni . Конструкции пиротехнических воспламенителей представлены на рис. 5 и рис. 6.

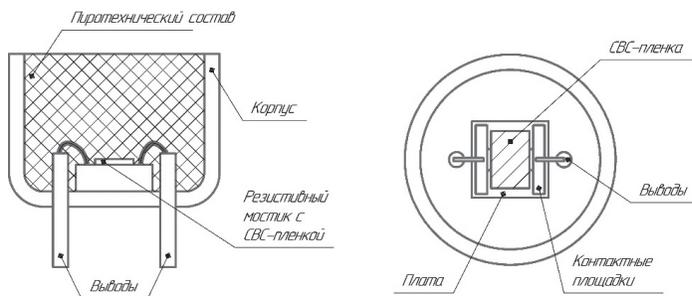


Рис. 5. Воспламенитель с резистивным мостиком из нитрида тантала

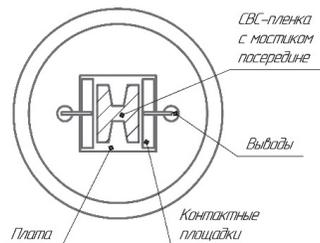


Рис. 6. Воспламенитель с резистивным мостиком из СВС пленки

Получены следующие основные характеристики:

- время активации воспламенителя от заряженного пускового конденсатора 100 мкФ не более 0,5 мс;
- площадь соприкосновения мостика с пиротехническим составом в 20–30 раз больше площади соприкосновения проволочного мостика

УДК 546.26-162

Исследование формирования двухслойного теплораспределительного элемента конструкции на основе композиционного материала алмаз — карбид кремния — кремний

Никитина М. Ю., Куликов Е. Н., Федоров Ю. Ю.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

Istok220@mail.ru

Проведены исследования процесса формирования двухслойного теплоотводящего элемента конструкции на основе композиционного материала алмаз — карбид кремния — кремний (АКК «Скелетон»). На композите выращены пленки CVD алмаза толщиной от 50 мкм.

Показан вариант его применения в составе транзисторных сборок.

Ключевые слова: поликристаллический алмаз; композиционный материал; теплоотвод; термохимическая обработка; тепловое сопротивление; CVD.

Постоянный рост мощности изделий СВЧ электроники требует все более эффективного отвода тепла от активной области приборов. Один из путей реализации данного требования — использование теплоотводов из материалов с высокой теплопроводностью.

В качестве высокоэффективного теплоотвода представляется перспективным применение композиционного материала с высокой (до 600 Вт/мК) теплопроводностью: алмаз-карбидокремниевый композит (АКК «Скелетон») [1], структура которого включает алмазные частицы, связанные в единый композит карбидокремниевой матрицей.

АКК «Скелетон» не является диэлектриком, что ограничивает область его применения. Для увеличения электрического сопротивления между кристаллом транзистора и металлическим фланцем без ухудшения его теплофизических свойств на поверхность композита предложено нанести тонкую пленку поликристаллического алмаза.

Для исследования процесса получения двухслойной теплоотводящей подложки алмаз — АКК «Скелетон» были подготовлены образцы композитного материала с составом: алмаз 59% об., карбид кремния 34% об., кремний 7% об. размером 10×10 мм и толщиной 3 мм и пластины из нелегированной стали размером 20×20×3 мм, отшлифованные до 13 класса чистоты.

Поверхность композита подвергалась термохимической обработке в водородной печи САМСо В16 в атмосфере водорода по технологии, представленной в [2].

За счет проведения двух термохимических обработок пластины из композитного материала были утонены до 1,0 мм, а шероховатость их поверхности составила около 2 мкм.

Пленки поликристаллического алмаза на поверхности композита выращивались методом химического осаждения из газовой смеси (CVD) метана и водорода при воздействии СВЧ-разряда на установке АТВ-127. Термошлифовка поверхности пленки поликристаллического алмаза проводилась по технологии, описанной в [3].

На поверхность пленки CVD алмаза методом магнетронного распыления в вакууме последовательно наносились пленки W и Ni. Толщина каждого слоя 0,2 мкм. Далее проводилось покрытие гальваническим золотом толщиной 3 мкм.

На поверхность полученного тепловода монтировался кремниевый кристалл транзистора с помощью твердого эвтектического сплава золото-германий при температуре 420 °С толщиной 0,02 мм.

Для измерения величины теплового сопротивления R_T применялся автоматизированный измеритель-анализатор тепловых характеристик Л2-109 [4]. У образцов теплопроводов, состоящих из двух слоев (композит и CVD алмаз), значение теплового сопротивления в полтора раза ниже, чем у образцов, собранных на чистом композите. Электрическое сопротивление подложек определялось с помощью измерителя приборных характеристик Прогресс-3000, после выращивания на поверхностях композита пленок поликристаллического CVD алмаза оно увеличилось на три порядка.

Таким образом, показано, что нанесение на поверхность тепловода из АКК «Скелетон» пленки поликристаллического алмаза уменьшает тепловое сопротивление транзистора и увеличивает электрическое сопротивление между кристаллом транзистора и металлическим фланцем.

Литература

1. Гордеев С. К., Жуков С. Г., Данчукова Л. В., Экстрем Т. С. Особенности получения композиционных материалов на основе алмаза, карбида кремния и кремния при низких давлениях // Неорганические материалы, 2001. — Т. 37. — № 6. — С. 691–696.
2. Дерябкин А. В., Куликов Е. Н., Фёдоров Ю. Ю., Гордеев С. К., Корчагина С. Б. Исследование процесса термохимической обработки поверхности композиционного материала алмаз — карбид кремния — кремний // Сборник докладов XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2023. — С. 398–401.
3. Дерябкин А. В., Духновский М. П., Куликов Е. Н., Федоров Ю. Ю. Исследование процессов планаризации поверхности поликристаллического алмаза методом термического растворения в системе алмаз-металл // Материалы XXI-II Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», 2019. — Т. 2. — С. 663–664.
4. Вяхирев В. Б. Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности, 2013. — № 3. — № 8.



УДК 621.3

Приборно-технологическое моделирование приборов силовой электроники в диапазоне рабочих напряжений от 1200 до 6500 В

Кравчук Е. А.¹, Полохова Ж. В.¹, Романов Д. А.¹, Быкова А. В.²,
к. т. н. Машевич П. Р.³

¹ ООО «СИТРОНИКС СМАРТ ТЕХНОЛОГИИ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2
kryukovskiy@sitronics-smart.com

² АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

На базе пакета программ технологического и приборного моделирования Synopsys Sentaurus TCAD был разработан спектр приборов силовой электроники с рабочими напряжениями от 1200 до 6500 В. Разработаны следующие конструкции приборов: FRED диоды с рабочими напряжениями 1200 и 1700 В, FRD диоды с рабочими напряжениями 3300, 4500 В и 6500 В, IGBT транзисторы с рабочими напряжениями 3300, 4500 и 6500 В с конструкцией NPT и SPT. Проведена верификация и калибровка разработанных моделей ячеек и тестовых кристаллов в целях получения оптимальных характеристик макетных образцов.

Ключевые слова: приборно-технологическое моделирование силовых приборов; силовая электроника; быстросовсстанавливающиеся PiN диоды; FRD диоды; FRED диоды; облучение электронами и протонами; локальный контроль времени жизни; IGBT транзисторы; конструкция NPT; конструкция SPT; конструкция SPT+; стоп буферный слой.

Разработка технологии производства ЭКБ силовой электроники в текущий момент осуществляются в условиях жестких временных ограничений в виду санкционными ограничениями. Системы технологическое и приборного моделирования нацелены на сокращение количества экспериментальных запусков, необходимых для успешного выполнения проекта и изготовления устройства, фактически на сокращение времени разработки устройства, соответствующего требованиям ТЗ.

Алгоритм разработки ЭКБ силовой электроники в системе технологическое и приборного моделирования следующий:

- выделение элементарной ячейки, которая будет мультиплицирована в схеме и технологическое моделирование ячейки на базе эскизного технологического маршрута;
- разработка и проверка конструкции периферии, удовлетворяющей рабочему напряжению прибора;
- приборное моделирование статических и динамических характеристик и экстракция целевых параметров прибора;
- масштабирование прибора для получения заявленных характеристик;

- выбор оптимальных технологических и топологических параметров структуры по результатам моделирования;
- уточнение модели после получения результатов измерений тестовых структур и результатов РЭМ анализа;
- оптимизация модели для расчета макетных образцов прибора.

В рамках работ по созданию ЭКБ силовой электроники были разработаны следующие модели ячеек приборов и периферии:

- FRD диоды с рабочими напряжениями 3300, 4500 и 6500 В и FRED диоды с рабочими напряжениями 1200 В и 1700 В;
- IGBT транзисторы с рабочими напряжениями 3300, 4500 и 6500 В с конструкциями NPT и SPT+.

По разработанным моделям были уточнены технологические операции маршрута и топологические размеры, изготовлены тестовые кристаллы и проведены измерения на АО «Микрон». На основе экспериментальных данных проведена верификация результатов моделирования и настройка параметров численной модели для расчета макетных кристаллов.

Литература

1. Индришенок В. И., Певцов Е. Ф. Основы приборно-технологического моделирования в Sentaurus TCAD: Учебное пособие. — М: Московский технологический университет (МИРЕА), 2018.
2. Bellini M., Vobecky J. TCAD simulations of irradiated power diodes over a wide temperature range // 2011 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). IEEE, New York, 2011. P. 183–186.
3. Synopsys, Inc: Sentaurus device user guide, Version D-2010.03 (2010).



УДК 621.3

Особенности конструкции и технологии производства кристаллов силовых полевых транзисторов

Полохов А. М.¹, Власов В. А.¹, Быкова А. В.², Ашанин М. Е.², Шилов К. А.²,
к. т. н. Машевич П. Р.³

¹ ООО «СИТРОНИКС СМАРТ ТЕХНОЛОГИИ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2
apolokhov@sitronics-smart.com

² АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Силовая электроника — это интенсивно развивающаяся область науки и техники, охватывающая, по существу, все сферы деятельности человека — промышленность, добывающие отрасли, транспорт, электроэнергетика, в том числе ветровая и солнечная энергетика, связь и т.д. Один из основных элементов силовой электроники является переключаемый МОП-транзистор (MOSFET). Основные конструктивные требования, предъявляемые потребителями к силовому MOSFET являются:

- минимально возможное сопротивление;
- максимальное рабочее напряжение;
- максимальные скорости переключения;
- минимизация потерь энергии.

Рассмотрена возможность оптимизации параметров транзистора для различных применений, показано влияние конструкции кристалла на выходные характеристики изделия

Ключевые слова: силовой МОП-транзистор (MOSFET); Trench MOSFET; технология производства силовых полупроводниковых приборов.

В структуре MOSFET все параметры технологически связаны друг с другом, и ни один из них не может регулироваться независимо. Для уменьшения удельного сопротивления увеличивают число параллельных ячеек структуры, однако это приводит к увеличению размеров площади кристалла и его стоимости. Переход к вертикальному затвору — к Trench MOSFET позволил значительно увеличить плотность ячеек в кристалле.

На рис. 1 показано сравнение MOSFET и Trench MOSFET транзисторов.

Проверено влияние:

- конструкции ячейки:
 - полосковая;
 - квадратная;
- размеров элементов ячейки.

на динамические и статические параметры транзистора. Проведена оценка улучшения параметров кристалла по показателю качества транзистора FOM — Figure Of Merit: произведению сопротивления транзистора ($R_{\text{си.откр}}$) на заряд затвора (Q_3).

$$FOM = R_{\text{СИ.откр}} \cdot Q_3$$

Разработаны и изготовлены Trench MOSFET с напряжением 50 В, 80 В, 140 В.

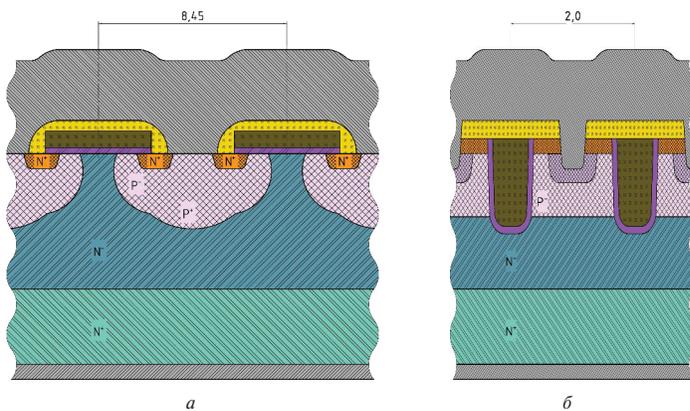


Рис. 1. Конструкция MOSFET (а) и Trench MOSFET (б) транзистора

Работы выполнены на линии 200 мм АО «Микрон».



УДК 621.3

Корректировка электрических, динамических параметров и тепловых потерь силовых транзисторов и диодов методом радиационно-термической обработки

Врнев Я. А.¹, Кравчук Е. А.¹, Чернышев Ю. П.¹, Власов В. А.¹, к. т. н.
Машевич П. Р.²

¹ ООО «СИТРОНИКС СМАРТ ТЕХНОЛОГИИ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2
yavrenev@sitronics-smart.com

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Целью работы показать, как различные способы облучения электронами и альфа-частицами влияют на статические и динамические параметры силовых транзисторов/диодов с максимальным обратным напряжением 1200–6500 В, изготовленных на подложках нейтронно легированного кремния n-типа. Быстровосстанавливающиеся диоды (далее — FRD) облучались электронами и альфа-частицами. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (далее — IGBT) облучались альфа-частицами. Определены оптимальные дозы при облучении электронами и положение пика дефектов при облучении альфа-частицами. Результаты подтверждены моделированием и экспериментами. **Ключевые слова:** быстровосстанавливающиеся диоды; биполярные транзисторы с изолированным затвором; кремний; облучение; альфа-частицы; транзисторы; регулирование времени жизни; моделирование.

Каждый новый день увеличиваются требования к повышению мощности и эффективности преобразовательных устройств. Одними из ключевых компонентов в преобразовательных устройствах являются силовые полупроводниковые приборы: транзисторы и диоды. Совершенствование технологий производства транзисторов и диодов позволяет реализовать сегодняшние потребности в уровне преобразования энергии на современном уровне. Радиационно-термическая обработка на сегодняшний день — это базовый технологический процесс для эффективного управления параметрами полупроводниковых приборов осуществляемый в процессе производства кристаллов силовых транзисторов и диодов. Классы диодов по динамическим параметрам подразделяются на группы — Ultrafast, Soft, Soft-Fast, Fast, Ultrafast, классы транзисторов подразделяются на группы — Low Losses turn-off, Ultrafast и WARP-speed, для каждого класса напряжения характерны свои группы изделий. Главным правилом управления динамическими и тепловыми параметрами полупроводниковых приборов является получение однородно или локально расположенных в структуре прибора радиационных центров, не приводящих к ухудшению электрических параметров всей структуры. Применение радиационно-термической обработки позволяет расширить возможность применения IGBT и FRD.

УДК 621.3.049

Общий подход к моделированию одиночных эффектов от нейтронов, протонов и ионов в цифровых КМОП-схемах**Зебрев Г. И., Родин А. С., Матейко А. А.***Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
gizzebrev@mephi.ru*

Предложена новая физическая компактная модель, которая позволяет единым способом моделировать сечения одиночных событий, вызванных тяжелыми ионами, протонами и нейтронами. Предложенный подход является аналитическим и основан на явных аналитических соотношениях и аппроксимациях с физическими параметрами подгонки. Численные расчеты (например GEANT4 или SRIM) могут быть использованы для настройки или уточнения феноменологических параметров или функций, включенных в модель, учитывая реальные геометрические конфигурации и химические составы устройств. **Ключевые слова:** одиночные эффекты; моделирование; тяжелые ионы; протоны; нейтроны; сечения; КМОП.

Характеризация, предсказание и моделирование одиночных эффектов в цифровой электронике — важнейшая задача, включающая в себя совместное описание широкого спектра сложнейших схемотехнических, приборных и ядерно-физических процессов. Использование громоздких специализированных средств проектирования крайне затруднено на техническом и принципиальном уровне. Например, GEANT4 и схемотехнические САД концептуально несовместимы, поскольку используют несовпадающий понятийный аппарат.

Необходима интеграция разных уровней и методов описания, которую невозможно провести без содержательной физической модели с параметрами, поддающимися перекрестному расчетно-экспериментальному согласованию.

Малые размеры чувствительных областей (ЧО) и существенно большие длины пробега продуктов ядерной реакции предполагают, что ЧО находятся в поле действия потока вторичных частиц.

Предлагаемый общий подход для расчета частоты сбоев и ВБР основан на использовании ЛПЭ-спектров продуктов ядерных взаимодействий (вторичные ТЗЧ), при этом применяются те же формулы, что и для первичных ТЗЧ. Содержательная часть модели основана на явных аналитических формулах, содержащих физические и схемотехнические параметры и функции, которые могут подгоняться либо рассчитываться с помощью ядерно-физических или схемотехнических программных комплексов. Детали этого подхода подробно описаны в работах [1–4].

В заключение мы перечислим основные преимущества описанного общего подхода:

- универсальность (единый подход для тяжелых ионов, нейтронов, а также протонов);
- общность (одинаковый подход как для прямой ионизации, так и для эффектов, связанных с ядерными реакциями);
- совместимость со схемотехническими параметрами и моделями (критический заряд/энергия, площадь ячейки и т. д.);

- совместимость с радиационными моделями (GEANT4, SRIM и т. д.);
- гибкость (может быть улучшен численными моделями и адаптирован под различные цели).

Литература

1. Zebrev G. I., Samotaev N. N., Useinov R. G. et al. Proton- and Neutron-Induced SEU Cross-Section Modeling and Simulation: A Unified Analytical Approach // *Radiation*, 2024. 4 (1). P. 37–49. URL: <https://doi.org/10.3390/radiation4010004>.
2. Zebrev G. I., Galimov A. M. Compact Modeling and Simulation of Heavy Ion-Induced Soft Error Rate in Space Environment: Principles and Validation // *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2017. 64. P. 2129–2135. URL: <https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2678685>.
3. Galimov A. M., Galimova R. M., Zebrev G. I. GEANT4 simulation of nuclear interaction induced soft errors in digital nanoscale electronics: Interrelation between proton and heavy ion impacts // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* 2019. 913. P. 65–71. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.039>.
4. Zebrev G. I. Modeling neutron ionization effects on high-density CMOS circuit elements // *Russ. Microelectron.*, 2006. 35. P. 185–196. URL: <https://doi.org/10.1134/S1063739706030073>.

УДК 621.382

Методическое обеспечение испытаний электронных компонентов к воздействию импульсных электрических перегрузок**Шемонаев А. Н.^{1,2}, Епифанцев К. А.¹, Кессаринский Л. Н.^{1,2}**¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31*² *АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
anshem@spels.ru*

Для эффективного парирования угроз электромагнитных воздействий на электронную аппаратуру необходимо исследовать поведение отдельных блоков аппаратуры при воздействии на них электромагнитных излучений стандартизированной формы в лабораторных условиях. Современная аппаратура содержит в своем составе электронные компоненты (полупроводниковые приборы и микросхемы). Отказ или сбой работы аппаратуры наступает ввиду деградации параметров или катастрофического отказа одного или нескольких электронных компонентов, другими словами, стойкость аппаратуры зависит от стойкости электронных компонентов. Исследуя физические механизмы деградации параметров и катастрофического отказа электронных компонентов, можно оценивать их стойкость к определенным стандартизированным уровням электромагнитного воздействия. Определяя пороговые значения этих уровней в виде графиков зависимости выделившейся за время действия тестового электрического импульса энергии в полупроводниковом объеме, можно делать вывод о применимости того или иного электронного компонента в составе действующего или разрабатываемого блока аппаратуры. В этом случае предпочтение отдается тому электронному компоненту, который может рассеять большее количество энергии без повреждения. Таким образом, определение уровней стойкости блока аппаратуры к электромагнитному воздействию сводится к задаче определения уровней стойкости электронных компонентов, из которых он состоит, к воздействию импульсных электрических перегрузок путем воздействия электрических импульсов с заданными характеристиками на выводы электронных компонентов в целях определения порогового значения энергии, выделяемой в полупроводниковом объеме кристалла. В докладе представляется метод оценки уровней стойкости электронных компонентов к импульсным электрическим перегрузкам за счет минимального набора тестовых воздействий.

Ключевые слова: электрический импульс; импульс напряжения; тиристорный эффект; скрытые дефекты; стойкость; надежность.

УДК 621.3

Новые аналоговые микросхемы

Адамов Д. Ю., Дюканов П. А., Зотов Л. А., Семихатов И. А.

АО «ДЦ «Кристал»

105187, г. Москва, ул. Щербаковская, 53, корп. 3

isemikhatov@dckristal.com

Проведенный АО «ДЦ «Кристал» анализ предложений производителей электронной компонентной базы (ЭКБ) на рынке РФ свидетельствуют о том, что на текущий момент отсутствуют или ограниченно представлены отечественные изделия для обработки аналоговых сигналов в современных типах корпусов. Также имеются существенные ограничения со стороны поставщиков ЭКБ зарубежного производства, связанные с перепрофилированием ряда предприятий, ограничением мощностей, модернизацией технологических линий и конечной продукции, а также ряда других факторов. В связи с этим принято решение о начале разработки и освоения ряда востребованных и перспективных микросхем.

В целях обеспечения конкурентоспособности продукции и расширения ассортимента доступного к применению ЭКБ рассматриваются следующие направления развития:

1. Приоритет для отечественного сырья и материалов. Применение сырья и материалов, изготовленных на территории РФ, позволяет снижать риск срыва договорных обязательств, оказывать влияние на сроки поставки и уровень качества, а также поддерживать отечественного производителя.

2. Локализация производственной цепочки. Сокращение всех производственных и кооперационных цепочек и их интеграция в пределах территории РФ, позволяет оказывать влияние на технологический процесс, уменьшать сроки поставки, повышать уровень качества и снижать риск срыва договорных обязательств.

3. Стандартизация покупных комплектующих изделий (ПКИ). Применение стандартизированных комплектующих изделий и технологических процессов сокращает процесс разработки и снижает издержки производства, в том числе в конечном изделии. Так же унификация применяемых ПКИ позволяет создать дублирующие сборочные производства.

4. Сертификация продукции. Большинство изделий ЭКБ являются продукцией широкого спектра применения, что требует проведения различных видов оценки надежности в процессе эксплуатации. Использование различных стандартов сертификации позволяет расширить рынок сбыта, что в свою очередь позволяет обеспечить гибкое ценообразование и предоставление гарантийных обязательств на весь срок жизненного цикла изделия.

5. Взаимозаменяемость. При разработке корпусных исполнений упор делается на применение корпусов со схожим форм-фактором изделий-аналогов. В связи с этим, у потребителей ЭКБ появляется возможность оперативного проведения макетирования и последующего замещения с минимальными сроками и финансовыми издержками.

6. Крупнопартийность. Снижение производственных издержек возможно при закупках ПКИ и изготовлении изделий крупными партиями, что в свою очередь

требует унификации и влияет на ценообразование, обеспечение складского и страхового запасов, снижение сроков поставки и насыщение рынка.

Таким образом, применение отечественного сырья и материалов, вариативность корпусного исполнения с учетом pin-to-pin, гибкая система ценообразования, полная локализация производства, а также оптимально возможные сроки поставки позволят насытить отечественный рынок востребованными изделиями микроэлектроники, улучшить тактико-технические характеристики конечных изделий, провести модернизацию и импортозамещение компонентов и узлов.

Литература

1. Как меняется рынок микроэлектроники в мире и в России (kommersant.ru).
2. Тренды российской микроэлектроники в 2024 году (sber.pro).
3. Президент «Элемента» Илья Иванцов рассказал «Ъ» о мечтах и реалиях российской микроэлектроники (kommersant.ru).
4. Перспективы развития российского микроэлектронного производства — Научно-технический центр ФГУП «ГРЧЦ» (НТЦ) (grfc.ru).
5. Мы стремимся разрабатывать компоненты, которые позволят потребителю создать лучшее изделие (mwsystems.ru).



УДК 621.3

Управление силовыми транзисторами в высокоэффективных импульсных преобразователях

Новиков П. А.

АО «Электрум АВ»

302020, г. Орёл, Наугорское ш., 5

mail@electrum-av.com

Рассмотрены особенности высокоэффективных импульсных преобразователей и требования к входящим в состав силовым транзисторам. Приведены основные типы транзисторов, принципы их управления со своей спецификой и, как следствие, требования к управляющим драйверам.

Ключевые слова: удельная мощность преобразователя; типы силовых транзисторов; MOSFET и IGBT-транзисторы; SiC-транзисторы; GaN-транзисторы; управление силовым транзистором; драйвер транзистора.

В силовой электронике мерой эффективности преобразователя является его КПД и удельная мощность. В свою очередь, уменьшение размеров в конечном счете упирается в повышение частоты. Таким образом, высокоэффективный преобразователь должен работать на высокой частоте, т.е. необходим транзистор, способный работать с как можно меньшими потерями на как можно большей частота.

В настоящий момент в силовой электронике в качестве силового транзистора нашли распространение кремниевые MOSFET, кремниевые IGBT, карбид-кремниевые MOSFET и нитрид-галлиевые FET-транзисторы. Данные транзисторы обладают своими преимуществами и недостатками и, как следствие, разные транзисторы находят применения для разных условий эксплуатации. Классические в относительно недорогих или мощных преобразователях, SiC в высокоэффективных преобразователях средней мощности, GaN в относительно маломощных, но самых современных устройствах.

И всеми этими транзисторами нужно управлять. Специфика управления, в свою очередь, накладывает свои требования на схему и именно поэтому требуется особый тип изделий — драйверы транзисторов с полевым управлением. Плюс к этому, работа на больших токах и с большой скоростью переключения создает свои сложности для построения системы управления. И в зависимости от того, с каким транзистором мы работаем и в каких режимах, эти сложности могут быть разные.

Для IGBT-транзистора нет больших скоростей переключения, но за то могут быть большие токи при большом коммутлируемом напряжении: до тысяч Вольт и тысяч Ампер. В таких режимах драйвер прежде всего должен быть устойчив к наведенным помехам.

Для кремниевого MOSFET примечательно большое значение тока обратного восстановления диода и, как следствие, импульсное смещение выходной средней точки драйвера. Т.е. выход драйвера должен быть устойчив к синфазной помехе.

В отличие от кремниевого MOSFET транзисторы SiC-MOSFET обладают гораздо лучшими характеристиками обратного диода, не уступающими FRD-диодам, но по причине низкого отрицательного запирающего напряжения драйвер

должен обладать мощным выходным каскадом или использовать дополнительные схемы шунтирования, такие как, например, «miller clamp».

Для GaN-FET наиболее характерное — очень высокая скорость переходных процессов на фоне очень малого напряжения управления. Все это накладывает очень серьезные требования к паразитным элементам выходной схемы драйвера, его топологии, проходной емкости и т. п.

Таким образом, разные транзисторы обладают своей спецификой, а значит требуются и разные драйверы тоже со своей спецификой. И если необходим универсальный драйвер для разных типов транзисторов, то он должен отвечать таким требованиям как малые габариты и как можно меньшие паразитные емкости и индуктивности, регулируемое выходное напряжение и выходной ток и, как следствие, регулируемая защита от пониженного напряжения, максимальная рабочая частота в сотни кГц, при этом должна сохраниться возможность работы на низкой частоте и в статическом режиме, устойчивость к синфазным и наведенным помехам, высокая устойчивость du/dt .

Литература

1. Матханов П. Н., Гоголицын Л. З. Расчет импульсных трансформаторов. — Ленинград: Энергия, 1980.
2. Sai Kiran Pullabhatla, Phaneendra Babu Bobba, Satyavani Yadlapalli Comparison of GAN, SIC, SI Technology for High Frequency and High Efficiency Inverters // E3S Web of Conferences 184, 2020.
3. Ng W. T., Mengqi Wang, Jingshu Yu., Weijia Zhang. Design Trends in Smart Gate Driver ICs for Power GaN HEMTs // Conference Paper, October 2018.
4. Nexperia Power GaN FETs: Performance, efficiency, reliability // Nexperia B. V., 2020.

УДК 53.088

Проективные методы повышения точности АЦП

Цыбульский О. А., к. т. н., доцент

Димитровградский инженерно-технологический институт —

филиал НИЯУ МИФИ

433511, г. Димитровград, ул. Куйбышева, 29

multimer@list.ru

Доклад посвящен развитию методов повышения точности АЦП, основанных на проективной модели измерения. Методы учитывают интегральную нелинейность преобразования. Применен критерий, оценивающий эффективность измерительного преобразования АЦП.

Ключевые слова: проективное измерение; АЦП; точность; критерий эффективности.

Проективная модель измерений открывает дополнительные возможности улучшения метрологических характеристик измерений. Улучшить характеристики АЦП можно не только за счет применения более совершенной технологии и схемотехники, но и с помощью применения структурных методов измерения. Рассматриваемые в докладе методы измерения известны. Это дифференциальный метод измерений и метод структурной коррекции погрешности. Но применены они к проективным измерениям, описываемым дробно-линейной функцией, поэтому учитывают нелинейность преобразований. Линейное АЦП является частным случаем проективного. Их объединяет то, что они оба построены на линейных элементах.

Обобщенное уравнение проективного измерения, объединяющее линейное и дробно-линейное уравнения аналого-цифрового преобразования, имеет вид [1]

$$\bar{X} = (1 + n\bar{X})\bar{K},$$

где $n = \{-1, 0, 1\}$, $\bar{X} = bX/X_m$, $\bar{K} = bK/a$ — нормированные параметры преобразования, a, b — постоянные коэффициенты, X_m — величина, воспроизводимая мерой.

Свойства и преимущества проективных АЦП в сравнении с линейными АЦП рассматривались на форумах «Микроэлектроника-2017» [2], «Микроэлектроника-2023» [3].

При дифференциальном методе измерения из измеряемого сигнала X вычитается сигнал точной меры X_m . Оставшаяся часть сигнала X измеряется уже с большей погрешностью, чем погрешность меры.

$$X = X_m + X_1, \quad \delta X = (X_m \delta X_m + X_1 \delta X_1) / (X_m + X_1).$$

Чем больше значение X_m по сравнению с X_1 , тем меньше результирующая погрешность δX .

Этот метод применяется в параллельно-последовательных АЦП (двухступенчатых, конвейрных и т. д.). При линейном измерении для осуществления второго (и последующих) этапов необходимо вносить изменения либо в значение меры, либо в коэффициент усиления сигнала. При этом применяются дополнительные блоки преобразования и вносятся дополнительные статические и динамические погрешности. Проективные АЦП позволяют исключить эти дополнительные блоки и погрешности, а также расширяют диапазон измерения.

На рис. 1 приведен пример улучшения полосы относительной предельной погрешности проективного 8-разрядного АЦП при применении двухступенчатого преобразования в диапазоне измерений 1:100 (моделирование в Multisim) в сравнении с полосой линейного 16-разрядного АЦП AD 7683 Analog Devices.

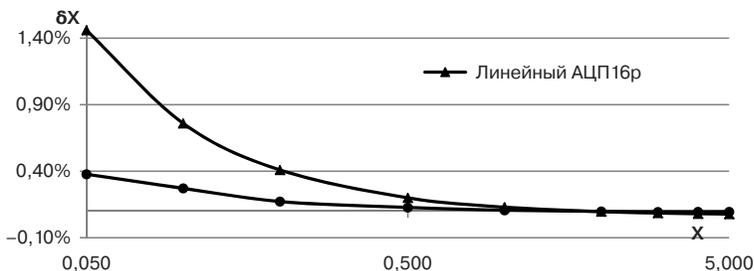


Рис. 1. Улучшение полосы относительной погрешности при двухступенчатом проективном преобразовании

Существенные возможности для улучшения точности предоставляет также структурный метод коррекции погрешности АЦ-преобразования, учитывающий проективную модель измерения. В проективной модели измерения для нормирования полосы предельной погрешности применяется трехчленная формула вместо двухчленной формулы, применяемой в линейной модели измерения [1]:

$$\delta X = \delta_a X_n / X + \delta_m + \delta_r X / X_n,$$

где X_n , X_b — нижняя и верхняя границы диапазона измерения; δ_m — мультипликативная составляющая относительной погрешности; $\delta_a = \Delta_a / X_n$ — составляющая относительной погрешности, определяемая аддитивной погрешностью преобразования Δ_a при $X = X_n$; $\delta_r = \Delta_r / X_n$ — составляющая относительной погрешности, определяемая погрешностью от нелинейности при $X = X_b$.

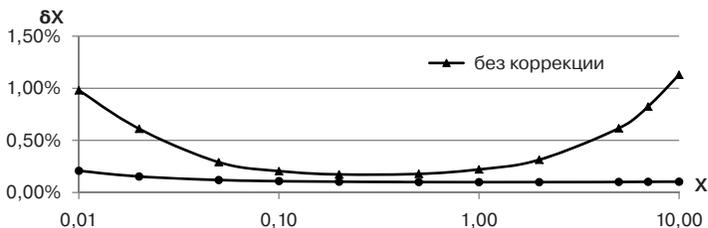


Рис. 2. Полоса предельной относительной погрешности 16-разрядного проективного АЦП до и после коррекции погрешности в диапазоне 1:1000 (моделирование в Multisim)

Трехчленная формула нормирует полосу предельной погрешности измерений, учитывая нелинейность АЦП, и позволяет исключить введение поддиапазонов. Структурная коррекция проективного преобразования на основе фундаментального инварианта сложного отношения позволяет скорректировать аддитивную,

мультипликативную и гиперболическую (нелинейную) составляющие предельной погрешности проективного АЦП.

На рис. 2 приведен пример улучшения полосы предельной относительной погрешности 16-разрядного АЦП при применении метода сложного отношения.

Средняя в диапазоне измерения относительная погрешность АЦП [1] до коррекции составляет 0,32%. После коррекции средняя относительная погрешность составляет 0,11%, из которых 0,1% — это погрешность задания тестовых сигналов.

Литература

1. Цыбульский О. А. Теория измерений. Основы проективной теории измерений: Учебное пособие для вузов. — СПб: Лань, 2024. — 192 с. ISBN 978-5-507-48185-9. — URL: <https://e.lanbook.com/book/367244> (дата обращения: 26.12.2023).
2. Цыбульский О. А. Сравнение характеристик линейного и дробно-линейного (проективного) аналого-цифровых преобразований // Международный форум «Микроэлектроника-2017». Сборник докладов. — Республика Крым, г. Алушта, 2–7 октября 2017. — Наноиндустрия, 2018. Спецвыпуск (82). — С. 344–350.
3. Цыбульский О. А. Проективная модель измерений. Проективные АЦП // Российский форум «Микроэлектроника 2023», 9-я научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. — С. 315–317.

УДК 621.382

Проб-карта для исследования сложнофункциональных СВЧ приемо-передающих СБИС на пластине

Амбуркин К. М.^{1,2}, Землеруб А. К.^{1,2}, Усачев Н. А.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

² *АО «ЭНПО СПЭЛС»*

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

ktamb@spels.ru

Представлена разработанная проб-карта, предназначенная для исследования сложнофункциональных СВЧ приемо-передающих СБИС на пластине.

Ключевые слова: проб-карта; СВЧ; приемо-передающая СБИС.

Разработка и выпуск новых типов радиочастотной (РЧ) и СВЧ приемо-передающей электронно-компонентной базы (ЭКБ) с большим количеством выводов (например приемо-передающие СБИС систем связи, радиолокации, радиочастотной идентификации) невозможны без проведения оперативного контроля параметров разрабатываемых изделий на различных этапах. Наиболее оптимальным способом контроля параметров на этапах разработки и запуска производства является использование зондовых методов контроля параметров изделий непосредственно на пластине, что в случае сложнофункциональных СБИС требует разработки специализированных устройств сопряжения и управления — проб-карт (от англ. probe card). Ряд компаний (FormFactor, MPI Corporation и др.) выпускают готовые проб-карты (в т. ч. изготавливают на заказ) и аппаратно-программные комплексы для тестирования ЭКБ на пластинах. Между тем данные решения, как правило, обладают высокой стоимостью, в ряде случаев непригодны для автоматизированных измерений параметров заказной РЧ ЭКБ, а также зачастую ограничены к поставке.

Таким образом, широкое применение нашел подход, основанный на разработке специализированных проб-карт для автоматизированного измерения параметров конкретного типа РЧ ЭКБ на пластинах с использованием имеющихся средств измерений и зондовой станции [1, 2].

Данная работа посвящена разработке проб-карты для контроля параметров приемо-передающей СБИС считывателя систем цифровой маркировки и идентификации диапазона УВЧ.

Требования к проб-карте составлены исходя из параметров подлежащего исследованию кристалла приемо-передающей СБИС считывателя:

- количество контактных площадок — 88 шт.;
- шаг между контактными площадками — 150 мкм;
- максимальная рабочая частота РЧ-линий — не менее 1000 МГц;
- максимальный ток на контакт — не менее 100 мА.

Макетный образец проб-карты изготовлен на основе четырехслойной печатной платы, выполненной из фольгированного стеклотекстолита FR4 с температурой стеклования 150 °С, и предназначен для совместного использования с зондовой станцией Summit 12000 (ф. Cascade Microtech, США). Внешний вид образца проб-карты приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид проб-карты. Контроль параметров проб-карты осуществлялся с использованием платы-заменителя кристалла

По результатам экспериментальных исследований проб-карты установлены значения основных параметров, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров разработанной проб-карты

Наименование параметра, единица измерения	Критерий работоспособности	Результаты исследований
Контактное сопротивление, Ом	не более 5	0,38
Максимальный ток на контакт, мА	не менее 100	не менее 1000
Прямые потери, дБ	—	не более 4,0
Максимальная рабочая частота РЧ-линий, МГц	не менее 1000	1770
Максимальная непрерывная РЧ-мощность, дБм	не менее 20	не менее 30

Как показывают результаты исследований, разработанная проб-карта соответствует предъявляемым требованиям и находится на уровне мировых разработок. Предложенный подход по разработке проб-карт применим для контроля параметров изделий ЭКБ для РЧИ, навигационных приемников, а также прочих аналого-цифровых изделий в диапазоне частот до 2 ГГц. Дальнейшее развитие данного подхода связано с увеличением рабочего диапазона частот разрабатываемых проб-карт за счет применения улучшенных зондовых выводов.

Литература

1. Maeda M., Nakamura M., Ota Y., Ishikawa O. On-wafer power measurement method using a new RF probe card // Proceedings of International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, 1995. P. 369–373.
2. Bullard B., McNamar R., McNally S. RF probing of custom ASIC's / 66th ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG), 2005.

УДК 621.37

«Визуальное» проектирование монолитной интегральной схемы малошумящего усилителя Ку-диапазона на основе отечественной 0,5 мкм GaAs рНЕМТ-технологии**Черкашин М. В., к. т. н., Коколов А. А., к. т. н., Бабак Л. И., д. т. н.***Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
mikhail.v.cherkashin@tusur.ru*

В докладе представлены результаты проектирования монолитной интегральной схемы (МИС) малошумящего усилителя (МШУ) Ку-диапазона частот, выполненного на основе отечественной 0,5 мкм GaAs рНЕМТ-технологии.

Ключевые слова: GaAs; рНЕМТ; СВЧ МИС; малошумящий усилитель; Ку-диапазон.

В составе приемо-передающего тракта радиоэлектронных систем различного назначения применяются МШУ, параметры которых во многом определяют рабочие характеристики системы в целом. При этом для диапазона частот выше 10 ГГц МИС МШУ, как правило, выполняют на основе GaAs рНЕМТ-технологий [1]. Для достижения малого коэффициента шума желательно использовать транзисторы с длиной затвора 0,25 мкм или меньше. Однако грамотное проектирование и применение САПР позволяет разрабатывать устройства с высокими техническими параметрами и на основе технологий с большей топологической нормой.

В данной работе сделана попытка разработать МИС МШУ для Ку-диапазона частот на основе 0,5 мкм GaAs рНЕМТ-технологии АО «Светлана-Рост» [2]. При проектировании принципиальной схемы МШУ применялись методы, алгоритмы и программное обеспечение (ПО) для визуального структурно-параметрического синтеза СВЧ полупроводниковых устройств [3–6], разработанные в ТУСУР (Томск). Применение данных методик и ПО позволило разработать МИС МШУ с характеристиками, не уступающими параметрам устройств, выполненных на основе технологических процессов с меньшей технологической нормой.

Разработанный МШУ включает в себя три каскада усиления на транзисторах, включенных по схеме с ОИ. В каждом каскаде применяется схема автоматического смещения по постоянному току, что позволило отказаться от применения двупольного питания. Для совмещения условий согласования по сигналу и шуму, выравнивания АЧХ и повышения устойчивости МШУ в схеме присутствуют элементы отрицательной обратной связи (ООС): в первом — индуктивная ООС по току, во втором — параллельная ООС по напряжению в виде RLC -цепочки. Кроме того, для лучшего согласования входа и выхода усилителя со стандартным трактом передачи сигнала, а также выравнивания АЧХ в схеме МШУ используются реактивные согласующие цепи на входе, выходе и между вторым и третьим каскадами.

Разработанный МШУ имеет следующие характеристики: полоса рабочих частот (Δf) 12–17 ГГц, коэффициент усиления (G_r) не менее 27 дБ, неравномерность коэффициента усиления (ΔG) в полосе рабочих частот не более $\pm 0,5$ дБ, коэффициент шума (NF) не более 3,7 дБ, уровень согласования по входу ($|s_{11}|$) и выходу ($|s_{22}|$) не хуже -12 дБ, потребляемый ток (I_D) не более 100 мА, напряжение питания

(V_D) 4 В, уровень выходной мощности при сжатии коэффициента усиления на 1 дБ ($P_{out\text{ дБ}}$) не менее 13 дБм, размер кристалла МИС МШУ $2,5 \times 1,2$ мм².

Работа выполнялась в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор FEWM-2023-0014). Производство интегральных микросхем было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по гос. заданию на выполнение НИР «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса МРВ (FSMR-2023-0008)».

Литература

1. Virdee B. S., Virdee A. S., Banyamin B. Y. Broadband microwave amplifiers // Artech House, 2004.
2. Официальный сайт предприятия АО «Светлана-Рост». — URL: <http://www.svetlana-rost.ru/?page=main> (дата обращения: 03.09.2024).
3. Бабак Л. И., Черкашин М. В., Зайцев Д. А. «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ-устройств. Часть 1. Описание процедуры проектирования // Доклады ТУСУР, 2006. — № 6 (14). — С. 11–23.
4. Бабак Л. И., Черкашин М. В., Зайцев Д. А. «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ-устройств. Часть 2. Программная реализация и примеры // Доклады ТУСУР, 2007. — № 1 (15). — С. 10–19.
5. Babak L. I., Cherkashin M. V., Polyakov A. Y. A new “region” technique for designing microwave transistor low-noise amplifiers with lossless equalizers // Proc. of the 38th European MW Conf., EuMC 2008. MTT-S, Amsterdam, 2008. P. 1402–1405.
6. Бабак Л. И., Черкашин М. В., Зайцев Д. А. и др. Комплекс программ «визуального» проектирования транзисторных СВЧ-усилителей и пассивных цепей // Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». — Томск: В-Спектр, 2007. — Ч. 2. — С. 113–115.

УДК 621.383

Экспериментальное исследование кремниевого трансимпедансного усилителя ДС — 2,5 ГГц на основе 180 нм КМОП-технологии**Коряковцев А. С., Коколов А. А., к. т. н., Бабак Л. И., д. т. н.***Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
andrei.a.kokolov@tusur.ru*

Представлены результаты экспериментального исследования трансимпедансного усилителя на основе отечественной 180-нм КМОП-технологии для систем оптической связи со скоростями передачи до 2,5 Гбит/с. Были проведены измерения как отдельно взятого трансимпедансного усилителя на тестовой плате, так и в составе гибридного оптического приемника. Результаты работы подтвердили пригодность указанной технологии для изготовления усилителей трансимпеданса.

Ключевые слова: 180-нм КМОП; ИС; оптическая связь; ТИУ; трансимпеданс; ГВЗ; малосигнальные характеристики; коэффициент преобразования.

На сегодняшний день в текущих реалиях значительное внимание в России уделяется развитию микроэлектроники и электронной компонентной базы. Появляются новые программы развития сервисов MPW, совершенствуются технологии производства ИС на базе GaAs, GaN и КМОП. Наряду с этим постоянно финансируются проекты по разработке высокотехнологических устройств гражданского и двойного назначения. Кремниевые технологии производства постепенно набирают свою популярность в области аналоговых СВЧ ИС за счет того, что устройство получается более миниатюризированным, обладает низким потреблением, низкой стоимостью при массовом производстве чипов.

Основной целью настоящей работы является экспериментальное исследование трансимпедансного усилителя (ТИУ) диапазона частот ДС — 2,5 ГГц, разработанного на основе 180-нм КМОП-технологии, как отдельного элемента ЭКБ, так и в составе гибридного оптического приемника. **Подробное описание схемы исследуемого устройства с результатами моделирования изложено в работе [1].**

По результатам экспериментального исследования корпусированного ИС ТИУ на тестовой печатной плате были получены следующие характеристики: рабочая полоса частот ДС — 2,3 ГГц, коэффициент трансимпедансного усиления 60 дБОм, неравномерность ГВЗ в полосе пропускания ± 80 пс, уровень выходной мощности в точке сжатия на 1 дБ около $-3...-6$ дБм, что соответствует размаху по напряжению $V_{pp} = 0,3-0,4$ В на нагрузке 50 Ом.

По результатам тестирования КМОП ТИУ в составе гибридного оптического приемника, где ИС ТИУ соединяется напрямую с InGaAs p-i-n-фотодиодом 60Ф502АН5 при помощи разварочных проволочек с подачей напряжения смещения на ФД через кристалл ТИУ коэффициент преобразования составил порядка от -5 до -8 дБ в полосе пропускания ДС — 2,1 ГГц. Во втором случае, когда и ТИУ, и ФД имеют свои тестовые печатные платы, а гальваническая развязка осуществляется

посредством разделительных конденсаторов, коэффициент преобразования составил от 1 до -2 дБ в полосе пропускания ДС — 2,1 ГГц.

Таким образом, результаты исследования показали, что отечественная 180-нм КМОП-технология вполне пригодна для изготовления ИС трансимпедансных усилителей с рабочими частотами до 2,5 ГГц.

Работа выполнялась в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор FEWM-2023-0014). Производство интегральных микросхем было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по гос. заданию на выполнение НИР «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW (FSMR-2023-0008)».

Литература

1. Коряковцев А. С., Коколов А. А., Шеерман Ф. И. Разработка ИС-трансимпедансного усилителя на основе отечественной 180 нм КМОП-технологии для 2,5 Гбит/с оптических линий связи // Доклады ЭССУ, 2022. — № 1. — С. 38–41.

УДК 621.375.4

Разработка интегральной микросхемы маломощного усилителя на нитриде галлия

Желаннов А. В., Казанцева З. С., Калинин Б. В., Хеглунд И. Л.

АО «ОКБ-Планета»

173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1н

Изготовлена микросхема маломощного усилителя на нитриде галлия, работающего в X-диапазоне. Исследованы основные характеристики микросхемы, включающие коэффициент усиления, КСВН по входу/выходу, коэффициент шума.

Ключевые слова: нитрид галлия; микросхема; маломощный усилитель; коэффициент усиления; коэффициент шума.

Данный маломощный усилитель разработан по GaN технологии и состоит из трех каскадов усиления. В целях обеспечения параметров для первого и второго каскада были выбраны транзисторы с конфигурацией затвора 2×50 мкм, а для третьего каскада — 4×100 мкм. Сочетание транзисторов с данными размерами обеспечивает требуемое усиление, величину выходной мощности, удовлетворительное значение коэффициента шума, а также низкое энергопотребление.

Эпитаксиальные слои нитрида галлия выращивались на 4-х дюймовых подложках карбида кремния методом химического осаждения из газовой фазы с использованием металлорганических соединений.

Маршрут изготовления состоит из последовательности технологических операций, ключевыми из которых являются изоляция, формирования систем омических и барьерных контактов и пассивации поверхности, формирование сквозных металлизированных отверстий.

Изоляция активных областей приборных структур осуществлялась легированием полупроводниковых слоев с помощью ионов гелия. Изоляция с помощью легирования имеет преимущества перед травлением, поскольку сохраняется планарность поверхности.

Второй ключевой операцией является формирование омических контактов с минимальным контактным сопротивлением и приемлемой морфологией поверхности для проведения дальнейших технологических операций. Изготовления омических контактов осуществлялось путем электронно-лучевого напыления системы металлизации Ti/Al/Mo/Au на двухслойную систему фоторезистов с последующим удалением маски. Использование двухслойной системы фоторезистов обеспечивает формирование отрицательного наклона профиля стенки, облегчающего процесс удаления металла и позволяющая получить ровный край контакта.

Формирование контакта затвора осуществлялась с использованием электронной литографии на основе трехслойной системы электронных резистов для получения T-образного профиля. Длина затвора, Lg, получаемая на операции электронной литографии составляла 0,25 мкм. Контакты затворной металлизации получены напылением системы металлизации на основе Ni/Au и представляют собой набор единичных затворов с различной шириной.

На следующем этапе формирования производится пассивация поверхности и формирование соединений контактов истока проводится с помощью технологии воздушных мостов.

После формирования на пластине приборных структур, проводилась операция утонения подложки карбида кремния до толщины 100 мкм с дальнейшим формированием сквозных металлизированных отверстий и разделением на кристаллы. На рис. 1 показан внешний вид кристалла микросхемы малошумящего усилителя, полученного по описанной выше технологии.

Измеренные значения коэффициента усиления, коэффициент стоячей волны по напряжению входу, коэффициент стоячей волны по напряжению выходу и коэффициент шума показали значение 25 дБ, 1,6, 1,6, 3 дБ при напряжении питания 12 В в диапазоне частот 9,0–10,6 ГГц.

УДК 621.382.2/3

Российский 32-битный микропроцессор**Ян С. И.***АО «Светлана-полупроводники»**194156, г. Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27, лит. АМ, пом. 18-Н**s.i.yan@svetpol.ru*

АО «Светлана-полупроводники» разработана микросхема процессора для встраиваемых применений, ориентированная на задачи управления объектами, требующие выполнения большого объема вычислений. Микросхема изготавливается по технологии КМОП на технологических нормах 0,35 мкм, с четырьмя уровнями металлизации.

Ключевые слова: российский микропроцессор; процессор для встраиваемых решений; 32-разрядный микропроцессор.

На данный момент отечественный рынок сложной микроэлектронной продукции представлен преимущественно микроконтроллерными решениями общего назначения.

Силами Акционерного Общества «Светлана-полупроводники» был разработан и произведен микропроцессор для встраиваемых применений, ориентированный на задачи управления объектами, которые требуют выполнения большого объема вычислений.

Разработанное изделие имеет металлокерамический корпус 4229.132-3, совместимо с архитектурой компьютеров IBM PC, имеет возможность эмуляции системы команд семейства микропроцессоров i386, что позволяет использовать большое количество стандартного программного обеспечения и операционные системы, разработанные для данной архитектуры. Микросхема сочетает функциональность процессорного ядра Intel386EX и удобство использования основных периферийных устройств, встроенных в кристалл микросхемы.

Спроектированный кристалл разработанной микросхемы, наряду с микропроцессорным ядром, имеет набор функциональных устройств, таких как:

- устройство выборки, для обеспечения выработки 8 сигналов выборки в поле памяти или ввода/вывода, а также имеется возможность использования каждого канала выборки для управления количеством состояний ожидания, вводимых в шинный цикл;
- 2-канальный контроллер прямого доступа, для обеспечения управления передачей блоков информации между памятью и периферийными устройствами, а также между двумя различными адресными пространствами памяти без участия процессора. Запуск каналов может производиться от внешних событий (DRQ0–DRQ3), либо от внутренней периферии или программно;
- генератор и устройство управления мощностью, которые обеспечивают выработку программируемой тактовой частоты для процессора и встроенной периферии, а также реализуют функции управления мощностью;
- контроллер прерывания, который анализирует внешние запросы на прерывание (INT0–INT7) или запросы от периферийных устройств и передает в процессор обобщенный запрос на прерывание и код источника

запроса. Состоит из двух одинаковых контроллеров, программно совместимых с INTEL 82C59A, соединенных как ведущий и ведомый;

- порты ввода/вывода, представляет собой три универсальных 8-и разрядных канала ввода/вывода.
- контроллер регенерации, который вырабатывает циклы регенерации динамической памяти. Процесс регенерации обновляет отдельные строки в циклах фиктивного чтения, периодически обегая все необходимые адреса;
- контроллер асинхронных последовательных каналов, обеспечивающий пересылку информации по двум независимым каналам в четырех форматах старт-стоп. Каждый из каналов обеспечивает полнодуплексный режим обмена сообщениями;
- контроллер синхронных последовательных каналов, обеспечивающий синхронный обмен в дуплексном режиме.

При разработке микропроцессора не использовался послойный реверс-инжиниринг, в силу его невозможности и встроенной защиты, поэтому структуры процессорного ядра, периферийных устройств, а также схемо-топологические решения, используемые в микросхеме процессора разработаны в процессе ведения опытно-конструкторских работ по его созданию. Технологический процесс реализуется по проектным нормам 0,35 мкм на библиотеке стандартных элементов для проектирования микропроцессорных СБИС и осуществляется на территории страны. Что в свою очередь позволяет заявить, что дизайн кристалла не может иметь нарушений патентных прав, а итоговая микросхема является интегральной схемой первого уровня.

Литература

1. Оглуздин С.С., Куликов Д.А., Ян С.И., Сергеев П.А. Обзор функциональности российских микроконтроллеров // Электронные компоненты, 2023. — № 12. — С. 90–93.
2. ГОСТ Р 55893-2013. Микросхемы интегральные основные параметры. — Введ 2013-12-09. — М.: Стандартинформ: изд-во стандартов, 2014.

УДК 621.3.049

Комплект аналоговых базовых матричных кристаллов как платформа быстрой разработки импортозамещающих аналоговых микросхем**Попов А. Э.¹, Прокопенко Н. Н.¹, Пахомов И. В.¹, Кузнецов Д. В.¹, Дворников О. В.²**¹ *Донской государственный технический университет
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
mailap@mail.ru*² *ОАО «МНИПИ»
220113, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Якуба Коласа, 73
oleg_dvornikov@tut.by*

Дано обоснование целесообразности разработки аналоговых базовых матричных кристаллов (БМК) нового поколения в качестве платформы для реализации широкого спектра микросхем, предназначенных для систем управления и связи. Проведен анализ отечественного опыта в области БМК и путей их реализации.

Ключевые слова: базовый матричный кристалл; операционный усилитель; интегральный стабилизатор; измерительный усилитель; фильтр.

В настоящее время в промышленности существует значительная потребность в широкой номенклатуре аналоговых интегральных микросхем (ИМС) различной степени интеграции — операционные и инструментальные усилители, регуляторы и стабилизаторы напряжения, системы управления электродвигателями, аналоговые вычислители, фильтры на переключаемых конденсаторах и т. п.

При этом серьезной проблемой являются сравнительно небольшие объемы заказов (от сотен до тысяч шт.) специализированных ИМС, что делает процесс их разработки и мелкосерийного выпуска экономически неоправданным. В результате этого на рынке доминируют очень крупные вендоры, выпускающие аналоговые ИМС большими и сверхбольшими тиражами. К сожалению, ведущие мировые производители аналоговых ИМС находятся в странах, недружественных России.

Следует отметить, что ИМС общего назначения обычно универсальны, что приводит к необходимости использования значительного количества дополнительных элементов. В результате размеры и функционал проектируемого устройства могут не соответствовать требованиям заказчика.

Решить проблему выпуска специализированных аналоговых ИМС, в том числе сравнительно небольших тиражей, можно путем использования базовых матричных кристаллов (БМК). Срок изготовления партии полузаказных ИМС на основе БМК может составлять 4–6 недель после завершения проектирования принципиальной схемы против одного-двух лет при традиционном подходе. Ниже приведены примеры успешных разработок на основе аналоговых БМК в СССР и РФ.

БМК «Енисей-БМК» (ОКБ «Тор», СССР) — маломощный стабилизатор напряжения для прецизионного генератора со встроенным термостабилизацией (ОКБ «Тор» по заказу ЛНИРТИ, ПО «Светлана»).

БМК КБ1510ХА1-4 «Экзарх» (Таллинский электротехнический завод им. Х. Пё-гельмана, СССР) — КР548ХА1, КФ548ХА1 — усилитель промежуточной частоты с детектором амплитудно-модулированного сигнала.

БМК серии 1451 «Фархад» и «Старт» (НИИ «Дельта», НИИ «ТАП», СССР-РФ) — Н1451БА1У-А502 — многофункциональная БИС радиоприемного устройства в системах навигации.

К сожалению, в результате деструктивных процессов начала 90-х годов работы по развитию аналоговых БМК в РФ были свернуты и российская платформа для быстрого внедрения в серию аналоговых ИМС малой и средней степени интеграции была утрачена.

В то же время методология аналоговых БМК активно и успешно используется за рубежом для контрактного производства ограниченных партий специализированных ИМС.

1. Универсальный аналоговый БМК, содержащий значительное количество (200–5000) транзисторов различных типов, резисторов и конденсаторов.

2. Аналоговый БМК для реализации стабилизаторов напряжения и тока, усилителей, силовых коммутаторов, схем регулирования и управления нагрузками, содержащий не менее трех мощных элементов.

3. Структурный аналоговый БМК для обработки сигналов датчиков различных физических величин с учетом влияния радиации [1] и помех на линиях связи.

К текущему моменту у авторов имеются **технические требования на проектирование топологии** радиационно стойких элементов СВЧ (до 3 ГГц) аналогового БМК для 10 В / 1,5 мкм комплементарного биполярного технологического процесса с р-канальным полевым транзистором. На базе данного БМК был разработан и выпущен в кремнии на мощностях ОАО «Интеграл» ряд специализированных ИМС, для которых имеется полный комплект документации.

Имеется библиотека схемотехнических решений узлов, устройств и иных элементов систем управления, готовых к реализации на основе БМК. Библиотека содержит несколько тысяч схем (от отдельных каскадов до полностью сформированных IP-модулей с уникальными параметрами).

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-79-10023,
<https://rscf.ru/project/23-79-10023>.*

Литература

1. Dvornikov O. V., Tchekhovskiy V. A., Prokopenko N. N. et al. Radiation Hardened Components of Semicustom Analog Microcircuits // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № 7. P. 599–607. DOI: 10.1134/S1063739723070077.

УДК 004.052.42

Среда непрерывной интеграции для обеспечения процессов проектирования доверенных СФ-блоков и СБИС

к. т. н. Аряшев С. И., д. т. н. Власов С. Е., Гревцев Н. А., к. т. н. Чибилов П. А.*ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН**117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1**ngrevcev@cs.niisi.ras.ru*

Адаптация парадигмы непрерывной интеграции к проектированию и верификации аппаратного обеспечения является необходимым шагом при разработке доверенных СФ-блоков и СБИС. Применение данной парадигмы сводит к минимуму цикл обратной связи при разработке и интеграции и повышает прозрачность стадий жизненных циклов проектирования.

Ключевые слова: доверенная разработка; СБИС; автоматизация проектирования; непрерывная интеграция.

Концепция непрерывной интеграции и непрерывного развертывания (CI/CD, Continuous Integration / Continuous Delivery) [1] начала использоваться в программном обеспечении с конца 90-х годов, реализована в виде бесплатных и коммерческих программных решений и в настоящее время является отраслевым стандартом разработки ПО. Применение данной концепции позволяет повысить скорость и качество готовых решений за счет увеличения прозрачности стадий жизненных циклов разработки и проведения перекрестной проверки.

По мере роста сложности разрабатываемых микропроцессоров, увеличения числа одновременно разрабатываемых проектов и участников разработки выпуск качественно работающего доверенного микропроцессора [2] становится невозможным без организации доверенной системы разработки и тестирования. Хотя разработка аппаратного и программного обеспечения отличается как по своей сути, так и по финальному результату, обе практики имеют общие аспекты и в обоих случаях цель состоит в том, чтобы узнать, сможем ли мы в конечном итоге выпустить полностью функционирующий продукт согласно требованиям технического задания.

В работе показано, как адаптировать парадигмы непрерывной интеграции к проектированию и верификации аппаратного обеспечения таким образом, чтобы свести к минимуму цикл обратной связи при интеграции, повысить прозрачность разработки, сохраняя при этом имеющиеся наработанные подходы к верификации [3]. Применение непрерывной интеграции позволяет постоянно поддерживать стабильную версию проекта, быстро выявляя обновления кода, вносящие ошибки или потери производительности в проект, автоматически проверять межблочное взаимодействие, а также увеличивать взаимодействие между командами разработки, верификации и топологического проектирования СФ-блоков. В работе также показано, как можно использовать инструмент непрерывной интеграции с открытым исходным кодом, такой как Gitlab, для повышения доверенности разработки отечественных СФ-блоков и СБИС на всех стадиях жизненного цикла разработки.

*Работа выполнена в рамках государственного задания
ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2024-0003.*

Литература

1. Lai S. T., Leu F. Y. Applying CI/CD Process to Improve the Speed and Critical Quality of Perfective Maintenance // *Advances on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications*. BWCCA 2022. Vol. 570.
2. Аряшев С. И., Гревцев Н. А., Зубковский П. С., Чибисов П. А., Кулешов А. С., Петров К. А. Разработка программных моделей доверенного универсального микропроцессора и микропроцессорной системы на его основе // *Программные продукты и системы*, 2022.
3. Гревцев Н. А., Хисамбеев И. Ш., Чибисов П. А. Исследование способов повышения эффективности стохастического тестирования моделей микропроцессоров // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС)*, 2016. — № 2. — С. 8–15.

УДК 621.3.049

Разработка и производство пассивных компонентов для критической гражданской инфраструктуры: задачи, перспективы и необходимая государственная поддержка

Верник П. А.*АНО Консорциум «Пассивные электронные компоненты»
107031, г. Москва, ул. Петровка, 15/13, стр. 5
info@anokpek.ru*

Проведен системный анализ ситуации на российском рынке пассивных компонентов, применяемых в составе радиоэлектронной аппаратуры различного назначения. Разработаны предложения по развитию производства отечественных пассивных компонентов и повышению их доли в российской РЭА в условиях западных санкций и давления поставщиков из Юго-Восточной Азии. Сформированы предложения по инструментам господдержки.

Ключевые слова: пассивные электронные компоненты; критическая инфраструктура; доля отечественных компонентов; государственная поддержка.

По результатам проведенного анализа ситуации на российском рынке пассивных электронных компонентов (далее — ПЭК) определено, что по состоянию на начало 2024 г. в составе отечественной аппаратуры гражданского назначения доля импортных ПЭК составляла до 99 % по отдельным типам. В сегменте аппаратуры специального назначения зависимость от импортных ПЭК также имеется, однако их доля составляет порядка 40 %. В ходе анализа рассматривались ПЭК (конденсаторы, резисторы, соединители, моточные изделия и др.), применяемые в составе РЭА для различного применения, в том числе в вычислительной технике, являющейся важнейшим компонентом критической инфраструктуры.

Следует отметить, что выпускаемые в России ПЭК для спецприменения качественно превосходят импортные компоненты гражданского назначения, например, по надежности и температурному диапазону, однако уступают по ценовым параметрам и отдельным техническим характеристикам [6]. Например, цена российского керамического конденсатора в размере 1005 превышает в 13,5 раз цену импортного аналога, при этом емкость импортного конденсатора в размере 1005 в восемь раз больше отечественного аналога.

В условиях господдержки происходит постепенное повышение доли продукции российского происхождения в составе критической инфраструктуры [1, 2, 3]. Однако, несмотря на значительные сдвиги, зависимость от поставок зарубежных компонентов и программных решений сохраняется [4, 5].

Потенциал предприятий российской радиоэлектронной промышленности при сохранении тенденций, сформированных в последние годы, и при условии продления действующих и введения новых инструментов господдержки, способен обеспечить к 2030 году повышение доли отечественных ПЭК в составе аппаратуры гражданского назначения до 30–50 %, специального назначения — до 90 %.

С учетом сохраняющейся на данный момент зависимости от импорта основную опасность представляют прямые ограничения со стороны недружественных стран и риски вторичных санкций, которые могут привести к полной блокировке



поставок в Россию импортных ПЭК, применяемых для комплектования объектов критической инфраструктуры.

В целях обеспечения объектов критической инфраструктуры отечественными ПЭК решаются задачи:

- проводятся НИОКР и разрабатываются пассивные компоненты, не уступающую по техническим характеристикам компонентам иностранного производства;
- запускаются новые производства, включая решение вопросов выбора и освоения технологии, закупки и запуска оборудования, организации поставок качественных материалов и химии, формирования кадрового потенциала;
- реформируются бизнес-процессы для гражданских поставок;
- внедряются новые экономические модели и методы расчета себестоимости ПЭК в целях последующего попадания в диапазон цен, приемлемых для производителей доверенной РЭА.
- С учетом того, что санкционное давление со стороны Запада будет нарастать, а дружественные страны Юго-Восточной Азии, при поставках будут ориентироваться на собственные коммерческие интересы, в перспективе необходимо реализовать следующее:
- на основе исторического и зарубежного опыта вернуть практику пятилетнего планирования для состыковки технологичного развития;
- синхронная разработка передовых образцов объектов критической инфраструктуры и ПЭК для их комплектования;
- производство ПЭК должно само становиться импортнезависимым (переход на российское оборудование и материалы);
- создание комплексного плана и нормативной среды для увеличения до 100% доли отечественных ПЭК в составе объектов критической инфраструктуры.

Необходимая господдержка для обеспечения доверенной РЭА отечественными ПЭК:

- выделение субсидий на поисковые НИР и НИОКР, в том числе на разработку оборудования и материалов;
- выделение субсидий на комплексные проекты по разработке и организации производства ПЭК;
- комплексная поддержка для повышения ценовой конкурентоспособности ПЭК отечественного производства (например, субсидирование ценовой разницы потребителю компонентов, таможенное регулирование и др.).

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 30.03.2022 г. № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
2. Постановление Правительства РФ от 14.11.2023 г. № 1912 «О порядке перехода субъектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации на преимущественное применение доверенных программно-аппаратных комплексов на принадлежащих им значимых объектах критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».

3. Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
4. Шиллер В., Шпак В. Независимость российской электроники от импорта необходима и возможна // *Электроника: Наука, технология, бизнес*, 2016. — № 6 (156). — С. 145–149.
5. «Черту, которая удерживала нас от использования российского ПО, мы уже перешли». Замминистра промышленности и торговли Василий Шпак — в интервью «Ъ FM». — URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5413322>.
6. Савицкий В., Раскин А. Зарубежные и отечественные многослойные керамические конденсаторы: технологии, категории качества // *Электроника: Наука, технология, бизнес*, 2024. — № 5. — С. 56–64.

УДК 65.011.42

Научно-технические особенности подходов к освоению и производству гражданской электронной компонентной базы

Плис Н. И., к. т. н., Фролова И. Н., Белоусова Н. Н., к. э. н., Малиновский Р. В.
АО «Ангстрем»
122460, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 2, стр. 3
plis@angstrem.ru

Выделены ключевые научно-технические особенности подходов к освоению и производству гражданской электронной компонентной базы крупным предприятием ОПК радиоэлектронной промышленности в современных условиях. Сформулированы технические и экономические задачи предприятия применительно к требованиям заказчиков продукции для гражданского применения.

Ключевые слова: электронная компонентная база для гражданского применения.

АО «Ангстрем» является ведущим разработчиком и производителем интегральных микросхем, силовых полупроводниковых приборов, средств бесконтактной радиочастотной идентификации. Наша компания входит в реестр предприятий ОПК, является стратегическим и системообразующим предприятием радиоэлектронной промышленности федерального значения, на внутреннем рынке взаимодействует более, чем с 700-ми потребителями. Выпускает продукцию более 4000 наименований следующих продуктовых направлений: микроконтроллеры, микропроцессоры, стандартные цифровые интегральные схемы, ПЗ БИС на основе БМК, интегральные микросхемы памяти, силовые полупроводниковые приборы (FRD, MOSFET, IGBT), интеллектуальные силовые ключи, операционные усилители, АЦП-ЦАП, LED-драйверы, драйверы для управления IGBT модулями, драйверы силовых ключей, силовые модули и др. в различных конструктивах: металлокерамических, металлостеклянных, металлопластмассовых корпусах.

Заказчики гражданской электронной компонентной базы из таких отраслей, как: автоэлектроника, светотехника, медтехника, общественный транспорт, ставят перед нами следующие задачи и требования:

- большие объемы и сроки поставок;
- ценообразование;
- корпусное исполнение pin-to-pin;
- обеспечение качества, надежности, проведение отбраковочных испытаний в производственном процессе;
- сроки эксплуатации;
- материалы и их наличие.

Отличие гражданской продукции от продукции с военной приемкой заключается в требованиях к доработке кристалла (утонение) под металлопластмассовый корпус, адаптации контактных площадок, унификации кристалла под корпуса, разработке, созданию, использованию специального технологического оборудования (высокопроизводительные автоматизированные сборочные линии по безлюдной технологии, многостаночное обслуживание), разработке высокопрецизионной оснастки и инструмента, штампов, вырубки рамки, гибки, обрубки и т.д.

Выдвигаются требования к аттестации изделий, внедрению технологических отрабоковочных испытаний в процессе изготовления изделий, проведение контрольных технологических операций, автоматизации контроля измерений.

Преимуществами нашей гражданской продукции являются: принцип кристаллов БМК (базово-матричные кристаллы), что позволяет осваивать и выпускать иностранные аналоги pin-to-pin, подтвержденное качество в части импортозамещения, решение вопросов ценообразования, как требования к российской комплектации, наши изделия включены в перечень продукции российских производителей в соответствии с требованиями ПП-719, информация об этом отражена в ГИСП МИНПРОМТОРГА РОССИИ.

Гражданская продукция является двигателем научно-технического прогресса для крупных предприятий ОПК радиоэлектронной промышленности, решение вопроса автоматизации, механизации позволит подойти к конкурентноспособной цене гражданской электронной компонентной базы на внутреннем рынке Российской Федерации.

УДК 004.056

Инфраструктура доверия. Как обеспечивается безопасное доверенное взаимодействие всех компонентов инфраструктуры.

Груздев С. Л.

АО «Аладдин Р.Д.»

129226, г. Москва, ул. Докукина, 16, стр. 1

- Требования доверия к ИС и ее элементам.
- Как обеспечить высокий уровень доверия в критически важных ИС.
- Как обеспечить доверие к ИТ-инфраструктуре при использовании недоверенных компонентов.
- Ключевые компоненты для построения безопасной доверенной ИТ-инфраструктуры и защищенных ИС.

Термин «доверие» пришел из стандарта ISO/IEC 15408. При переводе стандарта, в термин «Доверие» вместили 3 разных понятия, с разными сущностями — это уровни «Confidence», «Assurance» и «Trust».

Нижняя ступень пирамиды — Confidence. Это наше предположение, наша уверенность, что система работает так, как мы ожидаем, как нам обещали.

Средний уровень — это Assurance. Это доказанная уверенность.

Должна быть единая точка доверия, аналог электронного нотариуса, которому все доверяют и который всех проверяет и выдает электронный сертификат, когда мы хотим обменяться данными в системе. Это следующий уровень доверия — следующая ступенька в пирамиде доверия. Корпоративный центр обслуживания сертификатов.

Следующий уровень — это уровень Trust. Это уровень гарантий. Это вершина пирамиды. Что нам дает гарантии? Гарантии нам дает предыдущая ступень пирамиды — доверенное взаимодействие, а также доверенная электроника, доверенные технологические стеки, разработка безопасного ПО, и так далее. Мы часто слышим, надо делать доверенную электронику, внедрять отечественные процессоры, но, если не выстроено доверенное взаимодействие между элементами инфраструктуры, толку не будет.

Сейчас мы находимся на самом нижнем уровне пирамиды доверия — на уровне Confidence. Мы предполагаем, что все работает, как мы ожидаем. Сейчас электронные сертификаты выдает Microsoft CA, это «бесплатный сыр в мышеловке», этот бесплатный софт, который принимает решение «свой-чужой», это единая точка доверия. И пока этот «электронный нотариус» не будет замещен, доверия мы не построим. В то же время это и потенциальная точка отказа для ИТ-инфраструктуры. Если она перестанет работать, остановится работа ИТ-системы. Это ключевой компонент доверенной ИТ-инфраструктуры.

Многие компании сейчас находятся в процессе миграции на Linux. Это правильно, другого пути у нас нет. Но в Linux все не так, как в Windows. Нет привычной инфраструктуры открытых ключей корпоративного уровня. Мы создали решение, чтобы обеспечить многофакторную аутентификацию, PKI, чтобы обеспечить доверие в ИТ-системах на Linux.

Следующая проблема — это безопасность данных. Почему атакуют наши предприятия, потому что там ценные данные. Вместо выстраивания заборов — систем предотвращения, вторжения и т. д., нужно защищать сами данные. Если они не зашифрованы, они будут украдены. Шифрование данных — это очень важная технология для обеспечения безопасности данных.

Еще одна важная задача — обеспечение безопасной дистанционной работы. Мы все мобильные, если устройство вынесено за периметр организации, есть вероятность кражи, потери — данные нужно шифровать.

УДК 621.3

Использование технологии РКІ в цепочке поставки доверенных ПАК

Дьяков О. Н.

АО «Аладдин Р.Д.»

129226, г. Москва, ул. Докукина, 16, стр. 1

В настоящее время особая роль уделяется процессам импортозамещения в автоматизированных системах критической информационной инфраструктуры (КИИ), основными компонентами которых являются различные электронные устройства со встроенным программным обеспечением.

Программно-аппаратный комплекс (ПАК) это самостоятельно используемое, законченное техническое изделие, состоящее из радиоэлектронной продукции и программного обеспечения, работающих совместно для выполнения одной или нескольких определенных задач, функционально-технические характеристики которого задаются исключительно совокупностью программного обеспечения и радиоэлектронной продукции и не могут быть реализованы при их разделении.

Доверенный программно-аппаратный комплекс, относится к классу радиоэлектронного оборудования, соответствующего требованиям: обеспечения технологической независимости критической информационной инфраструктуры, функциональности, надежности и защищенности.

Одним из необходимых условий обеспечения доверия является использование надежной цепочки поставок аппаратного и программного обеспечения при разработке, производстве и эксплуатации ПАК.

Поставка современного программного обеспечения происходит в географически распределенной среде и напоминает цепочку поставок оборудования, которая состоит из различных участников, включает в себя различные этапы, требует соблюдения множества правил и поддержки целостности артефактов на всех этапах доставки.

Обеспечить целостность и конфиденциальность цепочки поставки программного обеспечения можно за счет использования технологии инфраструктуры открытых ключей (РКІ).

Инфраструктура открытых ключей — это криптографическая экосистема, управляющая выпуском цифровых сертификатов.

Цифровые сертификаты защищают конфиденциальные данные, обеспечивая безопасную коммуникацию и предоставляют цифровые идентификаторы для пользователей, устройств и приложений.

Ключевым моментом в создании и использовании доверенной цепочки поставки на основе РКІ является применение аппаратного корня доверия (RoT), который формируется на этапе производства доверенной ЭКБ. Немаловажным аспектом является наличие доверенного первичного загрузчика, который выполняет операции инсталляции и обновления прошивок, опираясь на функции аппаратного корня доверия.

УДК 004.054

Оценка эффективности тестовых испытаний встроенного ПО

Москвин Д. А., к. т. н., Овасапян Т. Д., к. т. н., Грибков Н. А.*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
moskvin@ibks.spbstu.ru*

В докладе представлен энтропийный подход к оценке эффективности тестовых испытаний встроенного ПО, направленный на выявление тестовых сценариев, максимально снижающих неопределенность в отношении алгоритмов функционирования ПАК.

Ключевые слова: встроенное программное обеспечение; энтропия; неопределенность; испытания.

В докладе представлен подход к сравнению различных типов тестовых испытаний встроенного программного обеспечения (ПО) в доверенных ПАК, где наиболее эффективным является испытание, результаты которого в наибольшей степени информационно значимы. Подход базируется на проверке энтропийного критерия, который сформулирован следующим образом: встроенное ПО считается допустимо доверенным, если в результате проведения над ним ряда экспериментов наблюдается снижение уровня энтропии (неопределенности) состояний исследуемого ПО до некоторого допустимого.

При проведении испытаний уровень неопределенности снижается неравномерно: на большую или меньшую величину, сразу либо по прошествии некоторого времени. Результатом испытания может быть увеличение числа выходных состояний, доступного исследователю, за счет получения новых знаний о работе программы (наличие недокументированных возможностей, передача данных на удаленный сервер и т. п.), что также увеличивает энтропию.

Представлено сравнение распространенных подходов к тестированию ПО и результаты эксперимента по определению оптимальных испытаний на основе предложенного подхода к оценке их информационной значимости. Дополнительно показано, что за счет исключения фрагментов программного кода с высоким уровнем доверия удалось снизить объем кода, который необходимо анализировать в дальнейшем.

Литература

1. Yang L. et al. Entropy and software systems: towards an information-theoretic foundation of software testing // Proceedings of the FSE/SDP workshop on Future of software engineering research, 2010. P. 427–432.
2. Villasenor C. et al. Germinal center optimization algorithm // International Journal of Computational Intelligence Systems, 2018. Vol. 12. № 1. P. 13–27.
3. Gribkov N.A., Ovasapyan T.D., Moskvina D.A. Analysis of Decompiled Program Code Using Abstract Syntax Trees // Automatic Control and Computer Sciences, 2023. Vol. 57. № 8. P. 958–967.

УДК 681.5.09

Интеллектуальный анализ физических характеристик функционирования ПАК

Москвин Д. А., к. т. н., Югай П. Э.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
moskvin@ibks.spbstu.ru*

Представлены результаты практических исследований в части оценки доверенности ПАК, наличия в нем уязвимостей и вредоносного ПО путем анализа физических характеристик его функционирования, в том числе тепловых и электрических.

Ключевые слова: доверенность; физические характеристики; программные закладки; аппаратные закладки.

Ключевой идеей доклада является демонстрация того, что физическая логика функционирования программно-аппаратных комплексов (ПАК) имеет физическое воплощение, вследствие чего актуальным является направление, связанное с оценкой доверенности ПАК через контроль значений его физических характеристик.

Воздействия на ПАК могут включать его аппаратные и программные модификации, также влиять на функционирование ПАК могут непреднамеренные ошибки [1]:

- аппаратные закладки — устройства в электронной схеме, скрытно внедряемые к остальным элементам, способные влиять на работу ПАК;
- программные закладки — преднамеренно внесенные в программное обеспечение функциональные объекты, которые при определенных условиях (входных данных) инициируют выполнение неописанных в документации функций программного обеспечения, приводящих к нарушению конфиденциальности, доступности или целостности обрабатываемой информации;
- непреднамеренные ошибки могут возникать из-за дефектов в электронно-компонентной базе (заводской брак, повреждения вследствие некорректной эксплуатации/транспортировки).

Представляя собой единую взаимосвязанную микросистему, интегрирующую в единый контур физические и информационные процессы, ПАК будет проявлять все происходящие внутри него изменения и попытки воздействовать на него извне либо информационно — в выходных данных и принимаемых состояниях, либо физически — в изменениях значений различных характеристик, таких как потребление напряжения [2], температура [3], электромагнитное излучение [4], вибрации [5] и т. п.

В докладе представлены результаты ряда практических исследований в части определения доверенных ПАК путем выявления информационных деструктивных воздействий на них через анализ физических характеристик ПАК.

Литература

1. Сюй Т., Тан С. Обнаружение вредоносной активности с использованием машинного обучения по физическим характеристикам // Международная конференция по вычислительной науке и вычислительному интеллекту, 2022.
2. Цзюньфэн З., Хуэй З., Сун Д., Сяосюн З. Прогнозирование энергопотребления и обнаружение аномалий на основе трансформатора и К-средних // Границы энергетических исследований, 2021.
3. Лю В., Цзян Х., Че Д., Чен Л. и Цзян Ц. Метод обнаружения температурных аномалий в реальном времени для Интернета вещей // Proceedings of the 5th International Conference on Internet of Things, Big Data и Безопасность, 2020.
4. Хан Х.А., Сехатбахш Н., Нгуен Л.Н. Обнаружение вредоносного ПО во встроенных системах с использованием модели нейронной сети для сигналов электромагнитных побочных каналов // J. Hardw. Syst. Secur. 3, 2019.
5. Сиганос А. Обнаружение аномалий по информации о вибрациях // Математика и информатика, 2019.



УДК 004.054

Практика исследования доверенности ПАК с помощью техники направленного фаззинга

Иванов Д. В., к. т. н., Писков А. А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
ivanov@ibks.spbstu.ru

В докладе представлена техника направленного фаззинга, позволяющая обеспечивать полноту и глубину тестирования комплекса физических и программных характеристик ПАК для оценки его доверенности.

Ключевые слова: тестирование; направленный фаззинг; оценка доверенности.

Фаззинг представляет собой перспективную технику тестирования программного обеспечения (ПО), состоящую в формировании заведомо некорректных входных последовательностей, обеспечивающих аварийное завершение работы программного обеспечения.

Проводится аналогия между фаззинг-тестированием ПО и испытаниями ПАК, состоящими в намеренной модификации физических параметров окружающей среды и изменении условий функционирования ПАК в целях определения пограничных условий его корректной работы. Ограничения аппаратного тестирования ПАК состоят в отсутствии целенаправленности и невозможности оценки полноты покрытия всех возможных условий испытаний.

Для устранения данного недостатка предлагается рассматривать фаззинг-тестирование в более широком смысле, включая совокупную модификацию физических и информационных параметров. Современные техники фаззинг-тестирования ПО, по сравнению с изначальными, обеспечивают целенаправленность анализа и возможность использования метрик покрытия программного кода, а следовательно, во многом и логики работы всего ПАК со стороны информационной составляющей.

В докладе представлены результаты практического исследования различных ПАК и встроенного ПО с применением техник фаззинга, состоящие в выявлении случаев возникновения некаузальных состояний исследуемых объектов, что в совокупности характеризует степень доверия к ПАК.

Литература

1. Raghul Saravanan, Sai Manoj Pudukotai Dinakarrao. The Emergence of Hardware Fuzzing: A Critical Review of its Significance, 2024. P. 1–13.
2. Hossain M. M., Vafaei A., Azar K. Z., Rahman F., Farahmandi F. and Tehranipoor M. SoCFuzzer: SoC Vulnerability Detection using Cost Function enabled Fuzz Testing // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 2023. P. 1–6.
3. Зегжда Д. П., Москвин Д. А., Овасапян Т. Д., Завадский Е. В., Данилов В. Д., Писков А. А. Программный комплекс динамического тестирования на безопасность программного обеспечения quick-launch fuzzer (QLF), 2022. — С. 1–3.

УДК 621.3.083

Исследование распознаваемости утечки по боковым каналам различных операций в процессе криптографической обработки информации

Тишин А. С.¹, Алексеев В. Д.^{1,2}, Михайлов В. Ю.^{1,3}¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
atishin@niime.ru² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

³ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В статье на примере реализации криптографического алгоритма AES рассмотрена распознаваемость различных типов математических операций в процессе обработки информации. Показано, что в аппаратной реализации криптографического алгоритма на каждом этапе обработки входящей информации можно выделить характерный сигнал. Рассмотрены способы реализации отдельных операций и степень их распознаваемости через отношение сигнал/шум и корреляцию величин сигналов и обрабатываемых данных.

Ключевые слова: анализ боковых каналов; отношение сигнал/шум; AES.

Сегодня встраиваемые информационно-физические устройства или так называемые устройства Интернета вещей повсеместно используются в различных отраслях промышленности и обеспечения жизнедеятельности [1, 2, 3]. В отличие от носимых или стационарных аппаратных платформ вычислительные устройства Интернета вещей подвержены более высокому риску внешнего аппаратного воздействия в целях извлечения информации, поскольку могут физически оказаться в руках третьих лиц на достаточно продолжительный период. Одним из наиболее эффективных и просто реализуемых неинвазивных воздействий является анализ энергопотребления устройства в процессе обработки закрытой информации [4].

Области изучения аналитиков боковых каналов лежат в анализе откликов отдельно взятых математических операций, реализованных в программно-аппаратной платформе. Наиболее широко анализируемой операцией является XOR из-за особенностей аппаратной реализации, которая дает наиболее распознаваемые сигналы в боковых каналах, а также применимости математического аппарата к самой операции в целях выявления слагаемых по модулю 2. Отдельно стоит отметить, что выявляемость операций вычисления элементов таблицы подстановок S-box, а также запись промежуточных данных в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) не так широко освещены, поскольку указанные операции имеют сравнительно низкую информативность по сравнению с операцией XOR. Однако выявляемость данных сигналов напрямую компрометирует обрабатываемые данные. Реализация возможности извлечения данных посредством анализа энергопотребления обусловлена особенностью цифровой КМОП-логики, на базе которой аппаратно реализованы математические и служебные операции обработки

и хранения информации. Данная особенность наглядно продемонстрирована на рис. 1. КМОП-инвертор — простейший логический элемент цифровой схемотехники, способен длительное время находиться в двух устойчивых состояниях в соответствии с уровнем напряжения на выходе элемента: логического «0» или «1». Возникновение всплесков энергопотребления соответствует динамическому режиму работы инвертора и происходит при смене логического состояния на его выходе. При изменении величины напряжения с логического «0» на логическую «1» происходит заряд некоторой нагрузочной емкости на выходе элемента, что обуславливает возникновение кратковременного всплеска энергопотребления. В свою очередь, при обратном переключении из логической «1» в «0» нагрузочная емкость разряжается на «землю», что также приводит к возникновению некоторого тока потребления. Представленная особенность характерна для всех логических элементов цифровой схемотехники вне зависимости от их сложности и позволяет с высокой точностью детектировать смену логического состояния на их выходе, поскольку статическое энергопотребление таких элементов незначительно в сравнении с динамическим энергопотреблением.

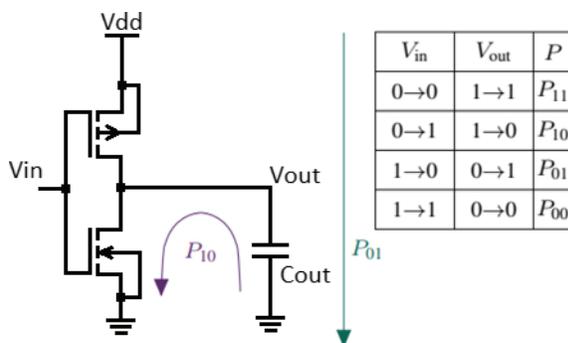


Рис. 1. Источники энергопотребления КМОП-инвертора

Для оценки объема информационных утечек по боковым каналам отдельных операций криптографического алгоритма AES был разработан автоматизированный стенд регистрации кривых потребления. Алгоритм оценки записи промежуточных значений в ОЗУ, а также вычисления значений элементов S-box заключался в регистрации осциллограммы энергопотребления в процессе обработки открытого текста. Поскольку момент записи, записываемая и обрабатываемая информация по условиям эксперимента известны, то отношение сигнал/шум [5] для оценки распознаваемости утечек, а также корреляция амплитуд сигналов показывают степень распознаваемости обработки информации.

Литература

1. Михайлов В. Ю., Котляров Е. Ю., Тимошин С. А., Васильев Е. С., Зубов И. А. Современные технологии интернета вещей // Наноиндустрия, 2023. — Спецвыпуск (9s). — Т. 16.

2. Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Васильев Е. С., Гордиенко А. В. Развитие защищенной аппаратной платформы NE32 на базе архитектуры RISC-V для применения в составе доверенных микроконтроллеров // *Наноиндустрия*, 2021. — № 14 (107).
3. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // *Нано- и микросистемная техника*, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
4. Kocher P. Differential Power Analysis // *In Advances in Cryptology—CRYPTO '99*. Aarhus Denmark, 1999. Vol. 1666. P. 398–412.
5. Тишин А. С. Отношение сигнал/шум как критерий определения уровня информационной безопасности интегральных схем // *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*, 2023. — № 4 (192). — С. 55–60.



УДК 537.312.54

Метод диагностирования изменений в топологии интегральных микросхем: оценка радиационной стойкости и обеспечение доверенности

Кульченков Е. А.¹, Жаровин А. Н.², Демидов А. А.^{1,2} Рыбалка С. Б.¹

¹ *Брянский государственный технический университет*

241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, 7

² *АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»*

241037, г. Брянск, ул. Красноармейская, 103

ewgeniy2000@mail.ru

На примере интегральных микросхем (ИС) линейных стабилизаторов (ЛС) напряжения показано, что регистрация откликов на радиационное воздействие позволяет диагностировать наличие изменений в их топологии.

Ключевые слова: доверенность; радиационная стойкость.

Для потребителей серийно изготавливаемых ИС актуальной является задача выявления контрафактных изделий, получения гарантий отсутствия «закладок» — незадекларированных функций в ИС или в более широком смысле — подтверждение доверенности ИС для применения на объектах критической информационной инфраструктуры (КИИ). Первичными методами оценки доверенности являются рентгеноскопия, декапсуляция и анализ кристалла ИС [1]. Однако анализ ИС с высокой степени интеграции крайне трудоемкий и не подходит при проверке большого количества ИС. Другим методом является регистрация физически неклонированных функций. В качестве одной из основных функций, не требующих разрушающего внедрения, является отклик ИС на радиационное воздействие [2]. В настоящей работе рассмотрен метод диагностирования изменений в топологии ИС с помощью получения уникальных откликов ИС на радиационное воздействие, характеризующих исследуемое изделие (паспорт ИС).

Объектом исследования были ЛС серии 5347Еххх в корпусе Н04.16-2В [3], с выходным напряжением 1,5 В (далее ИС-ЛС-1.5В), изготовленные АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ». Исследование проводилось с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса в следующем составе: рентгеновская установка РИК-0401, компаратор рентгеновского излучения ДРИ-0401, комплекс измерительной аппаратуры, программное обеспечение. Режим работы РИК-0401: анодное напряжение — 70 кВ, анодный ток — 150 мкА, скорость набора дозы облучения равнялась 100 ед./с (ед. — единицы компаратора ДРИ-0401). Были исследованы четыре типа ИС-ЛС-1.5В, которые по основным электрическим параметрам эквивалентны, но имеют отличия в исполнении выходного ключа (вертикальные транзисторы с различным разведением базы), токовых зеркал и дифференциальных каскадов. В процессе исследования измерялись основные параметры ИС-ЛС-1.5В (выходное напряжение, ток потребления, ток потребления в состоянии «Выключено», нестабильность по напряжению). При облучении ИС-ЛС-1.5В находился в активном электрическом режиме при $U_{пит} = 16$ В и токе нагрузки 0,001 А. Установлено, что наиболее чувствительными параметрами ИС-ЛС-1.5В к эффектам поглощенной дозы являются выходное напряжение, а так же нестабильность по напряжению.

Сравнение полученных результатов для 4 типов ИС-ЛС-1.5В показало наличие существенных отличий в стойкости к эффектам накопленной дозы. Значения стойкости по выходному напряжению отличались для разных типов более, чем 1,5 раза. Регистрируемый отклик на радиационное воздействие позволил диагностировать наличие изменений в топологии ИС-ЛС-1.5В, несмотря на эквивалентность электрических параметров исследованных четырех типов. Полученные результаты позволяют сформулировать способы повышения радиационной стойкости ЛС и выбрать наиболее выгодный вариант изготовления выходного ключа. Используемый метод актуален при контроле и оценка доверенности и радиационной стойкости на всех стадиях жизненного цикла изделий ЭКБ (при разработке, производстве и пр.).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы развития «Учебный дизайн-центр «Разработка, испытания и реверс-инжиниринг электронной компонентной базы» (соглашение от 5.03.2024 г. № 075-02-2024-1513) в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Литература

1. Алыков А., Корбанкова Т., Кулибаба А., Сашов А., Суконкин М. Рентгеновский контроль электронной компонентной базы // Электроника НТБ, 2021. — № 6. — С. 62–65.
2. Радиационная стойкость изделий ЭКБ. Научное издание / Под ред. А. И. Чумакова. — М.: НИЯУ МИФИ, 2015.
3. 5347ЕН1.5В4 — АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ». — URL: <https://group-kremny.ru/catalog/integralnye-skhemy/lineynye-stabilizatory-napryazheniya/5347en1-5v4>.

УДК 621.382

Этап функциональной верификации систем на кристалле на примере микроконтроллера для аналоговых систем

Степанов И. А.

АО «ДЦ «Кристал»

105187, г. Москва, ул. Щербаковская, 53, к. 3, этаж 3, комн. 311

istepanov@dckristal.com

Рассматриваются основные подэтапы функциональной верификации СНК: разработка плана верификации, разработка тестового окружения, обеспечение покрытия проекта тестами, проверка логической эквивалентности, составление отчета о верификации.

Ключевые слова: функциональная верификация; тестовое окружение.

Функциональная верификация является ключевым этапом разработки систем на кристалле (СНК); обеспечивающим их правильность и надежность. В этом докладе будут рассмотрены основные подэтапы данного процесса; а именно: разработка плана верификации; создание тестового окружения; обеспечение покрытия проекта тестами; проверка логической эквивалентности и составление отчета о верификации.

План верификации является фундаментом для всего процесса. Он включает в себя определение целей верификации, описание тестовых стратегий и критериев покрытия. Важно четко определить, какие функции и сценарии работы СНК должны быть проверены, чтобы обеспечить соответствие всем требованиям проекта.

Тестовое окружение представляет собой набор инструментов и симуляторов, необходимых для проведения верификации. Оно должно быть тщательно разработано и настроено для имитации всех возможных условий эксплуатации СНК. Это включает создание моделей окружения, тестовых генераторов и проверочных механизмов.

Основным объектом верификации является синтезируемый RTL-код. Для верификации используется набор тестов. Каждый тест предназначен для верификации определенной группы родственных функций и свойств устройства, которые содержатся в плане тестирования. Обеспечение покрытия проекта тестами является критическим аспектом верификации. Покрытие показывает, насколько полно протестированы все функциональные блоки и сценарии использования СНК.

Проверка логической эквивалентности гарантирует, что оптимизации и преобразования в проекте не изменили его функциональность. Этот этап включает сравнение результатов выполнения оригинальной и оптимизированной версий проекта. Логическая эквивалентность подтверждает, что проект остается верным своему исходному описанию после всех изменений.

Заключительный этап — составление отчета о верификации. Отчет включает результаты всех проведенных тестов, анализ покрытия, выявленные ошибки и их исправления. Он служит доказательством того, что СНК был тщательно проверен и соответствует всем установленным требованиям.

УДК 537.312.54

Исследование радиационной стойкости линейного стабилизатора напряжения положительной полярности с выходным напряжением 5 В

Кульченков Е. А.¹, Рыбалка С. Б.¹, Демидов А. А.^{1,2}, Дербунов И. В.²¹ *Брянский государственный технический университет
241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, 7.*² *АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»
241037, г. Брянск, ул. Красноармейская, 103
demandr@yandex.ru*

Экспериментально и теоретически исследовано влияние эффекта поглощенной дозы ионизирующего излучения на работу линейного стабилизатора напряжения положительной полярности ИС-ЛС3-5В с низким падением напряжения с использованием разработанного аппаратно-программного комплекса.

Ключевые слова: стабилизатор напряжения; радиационная стойкость; эффекты поглощенной дозы.

Для различных отраслей промышленности (космонавтика, авиастроение и др.) необходимо достичь надежности функционирования электронных компонентов при их радиационном облучении [1, 2]. Таким образом, исследование, контроль и обеспечение радиационной стойкости интегральных микросхем (ИС) линейных стабилизаторов (ЛС) напряжения в процессе разработки и производства является актуальной задачей [2, 3].

Экспериментально и теоретически был исследован ЛС положительной полярности с низким падением напряжения ИС-ЛС3-5В (аналог LM2937 [4]) в корпусе ТО-220, с выходным напряжением 5 В, изготовленный АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» по эпитаксиально-планарной биполярной технологии. Исследование проводилось с помощью рентгеновской установки РИК-0401 и разработанного аппаратно-программного комплекса для исследования и реверс-инжиниринга интегральных микросхем (КИРИ) в составе: автоматизированная система контроля электрических параметров ИС, адаптер и программное обеспечение позволяющие измерять и анализировать основные электрические параметры ЛС при радиационном облучении.

В ходе экспериментов были измерены основные параметры ИС-ЛС3-5В (выходное напряжение, минимальное падение напряжения, ток потребления, нестабильность по напряжению, нестабильность по току). Работоспособность ИС-ЛС3-5В (отсутствие функционального отказа) в процессе облучения контролировалась по значению выходного напряжения непрерывно. Микросхема ИС-ЛС3-5В при облучении находилась в активном электрическом режиме при напряжении питания 6,2 В и токе нагрузки 0,5 А. Экспериментальное исследование показало, что наиболее чувствительными параметрами ИС-ЛС3-5В к эффектам поглощенной дозы являются выходное напряжение и минимальное падение напряжения, а ток потребления, нестабильность по напряжению и нестабильность по току не выходят за пределы норм параметров.

Экспериментально установлено, что величина минимального падения напряжения изменяется от 0,38 до 0,418 В и не превышает норму параметра (не более 0,5 В) в исследованном диапазоне облучения до $325 \cdot 10^3$ ед. (ед. — единицы рентгеновского излучения, измеренные компаратором ДРИ-0401). Выходное напряжение ИС-ЛС3-5В варьируется от 5 до 5,18 В и ЛС сохраняет функциональное состояние работы без отказа в исследованном диапазоне облучения. Сравнительный анализ с зарубежным аналогом (LM2937) показал, что ИС-ЛС3-5В по параметрам выходного напряжения и минимального падения напряжения демонстрирует существенно большую радиационную стойкость к эффектам поглощенной дозы. Определена аналитическая зависимость выходного напряжения и минимального падения напряжения от поглощенной дозы ионизирующего излучения. Разработана эквивалентная схема замещения и SPICE-макромодель ИС-ЛС3-5В с учетом радиационного воздействия на стабилизатор. Показано, что разработанная SPICE-модель позволяет описать радиационное поведение ИС-ЛС3-5В по параметру выходного напряжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Интегральные микросхемы преобразователей аналоговых сигналов в металлополимерных корпусных исполнениях разных типов: разработка и освоение технологии, замещение импортных аналогов и организация серийного производства» (соглашение от 9.02.2023 г. № 075-11-2023-008) в организации головного исполнителя НИОКТР ФГБОУ ВО БГТУ.

Литература

1. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / Под ред. Г. Г. Райкунова. — М.: Физматлит, 2013.
2. Радиационная стойкость изделий ЭКБ. Научное издание / Под ред. А. И. Чумакова. — М.: НИЯУ МИФИ, 2015.
3. Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Кульченков Е. А. Исследование радиационной стойкости линейного стабилизатора напряжения // Успехи прикладной физики, 2023. — Т. 11. — № 5. — С. 446–454.
4. LM2937 500-mA Low Dropout Regulator, Texas Instruments. URL: <https://www.chipdip.ru/product/lm2937imp-5.0-nopb>.

УДК 004.056

Потенциал технологии безопасных вычислений Эльбрус при создании ПАК для КИИ

Мухин А. А.

АО «МЦСТ»

117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

Задача по переводу КИИ Российской Федерации на доверенные программно-аппаратные комплексы (ПАК), поставленная Президентом В. В. Путиным в Указе № 166 от 30.03.2022 (пункт 2б), комплексная. В стране только формируются ответы на самые базовые вопросы: что такое «доверенность», что такое «доверенные программно-аппаратные комплексы», какое отношение эти понятия имеют к понятию «российский».

Одно из важнейших направлений ПАК для КИИ — функциональная безопасность исполнения программ — доверенная среда исполнения в доверенных программно-аппаратных комплексах.

Платформа Эльбрус предоставляет ряд возможностей для выполнения Указа № 166 — как немедленно, так и в перспективе. Сам подход к построению платформы Эльбрус соответствует базовым требованиям, которые предъявляются к циклу разработки доверенной ЭКБ и, соответственно, доверенных ПАК на ее основе. Ключевые особенности платформы — это высокая предельная производительность аппаратуры (до 25 операций/такт в каждом ядре), аппаратная поддержка двоичной совместимости с ПО в двоичных кодах x86/x86-64, и наличие аппаратных средств противодействия атакам и ускорения поиска ошибок в ПО, написанном на компилируемых языках (C/C++ и др.). Все эти свойства будут востребованы в цикле внедрения и при переводе КИИ на отечественные ДПАК.

В докладе представлена терминологическая база, обзор существующих архитектурных решений безопасных вычислений, предложен поэтапный путь перевода КИИ на доверенную отечественную основу, представлены достигнутые результаты и планы реализации решения безопасных вычислений на платформе Эльбрус.

УДК 004.056

Обзор проекта ПНСТ «Критическая информационная инфраструктура. Доверенные интегральные микросхемы. Типовые факторы нарушения доверенности»

Сидорин Ю. Ю.

АО «НТЦ «Атлас»

127018, г. Москва, ул. Образцова, 38

sidorin_yuyu@rnd.sicnet.ru

Разработан проект предварительного национального стандарта «Критическая информационная инфраструктура. Доверенные интегральные микросхемы. Типовые факторы нарушения доверенности». Описано назначение документа, сценарий его применения и структура.

Представленный в докладе проект ПНСТ определяет типовой набор факторов, воздействие которых на процессы жизненного цикла интегральных микросхем может в процессе их эксплуатации являться источником:

- 1) рисков информационной безопасности, в результате:
 - некорректного определению требований по информационной безопасности к интегральной микросхеме,
 - некорректной (не соответствующей требованиям) реализации в интегральной микросхеме функциональных возможностей безопасности [1],
 - реализации в интегральной микросхеме возможностей и (или) параметров функционирования, позволяющих обойти или нарушить функциональные возможности безопасности;
- 2) рисков функциональной безопасности, в результате:
 - некорректного определению требований по функциональной безопасности к интегральной микросхеме,
 - некорректной (не соответствующей требованиям) реализации в интегральной микросхеме функций безопасности приборной системы безопасности [2];
- 3) рисков технологической безопасности;
- 4) рисков качества.

В проекте описываются факторы антропогенной природы:

- 1) направленные действия человека нацеленные на внедрение и(или) сокрытие уязвимостей в СБИС, то есть действия злоумышленника;
- 2) ненаправленные действия человека, производимые в следствии халатности либо случайные ошибки.

ПНСТ, проект которого рассматривается, предназначен для разработчиков и производителей интегральных микросхем, применяемых в компонентах критической информационной инфраструктуры.

Типовой набор факторов может использоваться для определения требований к системам управления качеством и системам управления безопасностью процессов разработки и производства. На основе него может проводиться:

- анализ угроз информационной безопасности актуальных для среды разработки и производства интегральных микросхем,
- анализ угроз информационной безопасности актуальных для активов (входных данных и продуктов) процессов разработки и производства интегральных микросхем,
- оценка рисков качества актуальных для процессов разработки и производства интегральных микросхем.

Набор факторов, включенных в ПНСТ, не является исчерпывающим и может быть дополнен и (или) уточнен в процессе идентификации угроз безопасности информации и оценки рисков для конкретной среды разработки интегральных микросхем и процессов разработки, производства и поставки.

Факторы нарушения доверенности приведены в применительно процессам жизненного цикла интегральных микросхемы этапов:

- исследование и проектирование,
- разработка,
- производство,
- поставка.

Для каждого из этапов определены типовые каналы и объекты воздействия факторов.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель.
2. ГОСТ Р МЭК 61511-1-2018 Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов. Часть 1. Термины, определения и технические требования.

УДК 621.3.049.77

СМК организаций как основа обеспечения доверенного жизненного цикла ЭКБ (на примере СМК АО «НИИМЭ»)

Панасюк В. Н., д. т. н., Кравцов А. С., Королева А. Н., к. т. н., Шипицин Д. С.,
к. ф.-м. н., Панкратов А. Л.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
akoroleva@niime.ru

В работе рассмотрены вопросы реализации основных принципов доверенности ЭКБ через создание специализированных систем менеджмента качества на предприятиях, реализующих различные этапы жизненного цикла создания ЭКБ. Показан практический опыт реализации алгоритмов управления критическими процессами микроэлектроники на примере СМК АО «НИИМЭ» при разработке базовых технологий, комплектов средств проектирования, фотошаблонов и сверхбольших интегральных схем на их основе.

Ключевые слова: базовая технология; доверенность; СМК.

В проект стандарта по доверенным интегральным микросхемам и электронным модулям заложены следующие принципы обеспечения доверенности, а именно: подтверждение соответствия технических характеристик продукции, а также соответствие требованиям по обеспечению технологической, информационной и функциональной безопасности.

Для развития современных технологий обработки данных, критически важным является разработка интегральных схем сверхвысокой степени интеграции с количеством транзисторов в кристалле от 1 млн и выше, включающего также СФ-блоки, а также встроенное ПО. Обеспечение качества такой ЭКБ должно происходить на всех этапах жизненного цикла разработки и изготовления таких изделий, который помимо технологической части производства кристаллов включает в себя: разработку DRM, экстракцию параметров транзисторов для получения их spice-моделей, разработку PDK, СФ-блоков, разработку конструкции и топологии СБИС, разработку и изготовление фотошаблонов. Кроме того, особенностью реализации этого цикла является генерация и использование очень больших объемов информации в цифровом формате (рис. 1).

Таким образом, наибольшую сложность для обеспечения доверенности ЭКБ представляет собой тот факт, что результатов измерения и испытаний продукции, необходимых для подтверждения качества, недостаточно для подтверждения свойств доверенности современных СБИС. Необходимо обеспечение прозрачности и контролируемости информационных потоков, соответственно процессы ЖЦП становятся объектами рассмотрения при подтверждении доверенности. Для реализации таких процедур требуются, в том числе, специализированные системы управления качеством (СМК).

В АО «НИИМЭ» разработана, внедрена и продолжает развиваться СМК, которая содержит алгоритмы управления такими процессами как: разработка базовых технологий, включая правила проектирования, PDK, DDK; разработка СБИС, разработка встроенного ПО, разработка управляющей информации для изготовления ФШ. Часть процессов СМК автоматизирована за счет собственных программных

комплексов. В основу СМК АО «НИИМЭ», помимо установленных требований к качеству готового изделия, заложен принцип прозрачности и проверяемости процессов на всех этапах разработки с учетом высокой степени их цифровизации, что дает потенциальную возможность интеграции с требованиями доверенности.

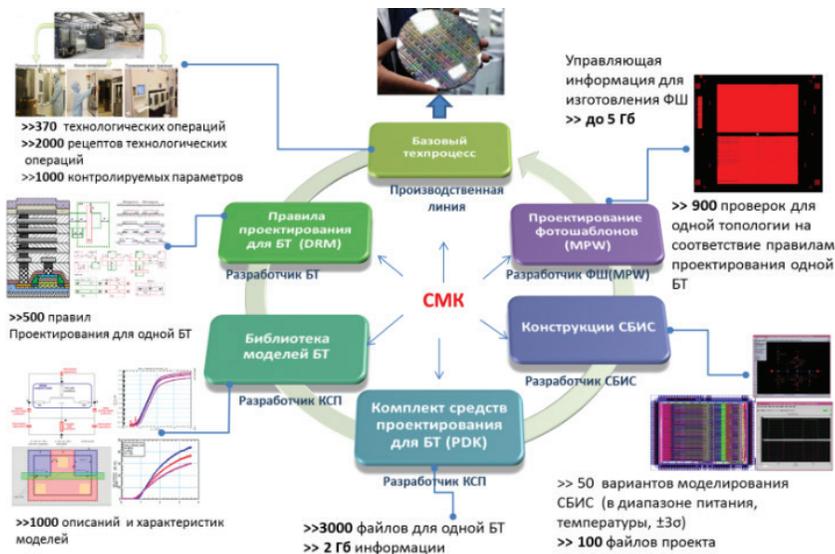


Рис. 1. Процессы, реализуемые при создании СБИС. Основные виды и объемы информации

Однако, при дальнейшем формировании системы требований и подтверждении доверенности возникает ряд вопросов, касающихся прежде всего организаций — разработчиков СБИС и СФ блоков, т. к. именно этап разработки состава и конструкции интегральной схемы является определяющим с точки зрения обеспечения доверенности.

1. Включение в ТЗ на проектирование СБИС требований по информационной безопасности.
2. Формирование доверенного маршрута проектирования с детальным описанием результатов на всех промежуточных этапах и квалификацией исполнителей.
3. Контроль результатов проектирования в отдельных контрольных точках маршрута квалифицированным персоналом службы качества или другим уполномоченным подразделением организации-разработчика.
4. Организация БД для хранения результатов проектирования (первичных файлов разработки СБИС, включая результаты моделирования, программные компоненты, управляющую информацию для ФШ, КД, ТД, и т. п.) для возможности проведения независимого контроля (при необходимости).
5. Проведение тестирования СБИС с учетом требований по информационной безопасности (особенно при наличии встроенного ПО) и оформление

соответствующих документов по результатам тестирования с указанием степени покрытия.

6. Формирование отличительных знаков ДЭКБ как в кристаллах, так и на корпусе микросхем.
7. Декларирование ответственным персоналом, участвовавшим в проектировании и разработке соответствия требованиям ДЭКБ.

Реализация этих требований потребует дополнительного анализа и обсуждения с профессиональным сообществом, т. к. предполагает внесение существенных дополнений и изменений в действующие процедуры проектирования организаций-разработчиков СБИС, а также во многом позволит распределить ответственность за обеспечение доверенности на ключевых этапах жизненного цикла.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93. EDN YOL-YNB.
2. Панасюк В. Н., Королева А. Н., Игнатов П. В. и др. Отдельные аспекты анализа и оценки качества базовых технологий с проектными нормами 180 и 90 нм в условиях ограниченных ресурсов // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 3 (187). — С. 77–88. DOI: 10.7868/S2410993222030101. EDN CPFVSE.
3. Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Васильев Е. С., Гордиенко А. В. Развитие защищенной аппаратной платформы NE32 на базе архитектуры RISC-V для применения в составе доверенных микроконтроллеров // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 76–78.

УДК 621.3.049

Комплект ЭКБ для устройств АСУ ТП и РЗА цифровых подстанций**Бумагин А. В., к. т. н., Шмаков Е. В.***АО «Микрон»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1**abumagin@mikron.ru*

Создаваемый комплект СБИС предназначен для построения аппаратуры автоматизации релейной защиты (РЗА) автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) полевого уровня цифровых подстанций. Приведено краткое описание и характеристики разрабатываемых микросхем. Разрабатываемая продукция является ЭКБ первого уровня

Ключевые слова: РЗА; АСУ ТП; микроконтроллер; АЦП; цифровой изолятор; Ethernet; RS-485; цифровой датчик температуры; драйвер.

В настоящее время высоким спросом пользуется оборудование устройств АСУ ТП и РЗА полевого уровня цифровых подстанций. По данным ПАО «Россети» среднегодовой объем потребления устройств многофункциональный измерительный преобразователь (МИП) составляет порядка 100 тысяч единиц в год, а преобразователей дискретных сигналов (ПДС) — не менее 4,5 тысяч единиц в год. В результате проведения межотраслевых совещаний была выявлена острая потребность более полутора десятков отечественных организаций, занимающихся созданием оборудования в интересах ПАО «Россети», в создаваемой номенклатуре ЭКБ.

В состав указанных устройств входят следующие основные элементы: микроконтроллеры; сигма-дельта АЦП; Ethernet-трансиверы; драйверы интерфейсов RS485/RS422; цифровые изоляторы; цифровые датчики температуры; ЭКБ для построения изолированных источников питания; пассивные и другие элементы и материалы.

До настоящего момента разработка и изготовление оборудование устройств АСУ ТП и РЗА полевого уровня цифровых подстанций выполнялась на основе ЭКБ зарубежного производства.

Вследствие введенных ограничений со стороны западных стран поставки материалов и комплектующих перечисленной ЭКБ в необходимых объемах, выпуск указанного оборудования стал фактически невозможен или экономически неэффективен.

Отечественные аналоги заявляемых микросхем, либо отсутствуют, либо созданы на основе зарубежных технологических процессов, и их поставка в требуемых объемах в настоящее время вследствие введенных экспортных ограничений не представляется возможной.

В состав создаваемого комплекта ЭКБ входят наиболее востребованные на сегодняшний день для целевой аппаратуры микросхемы:

- микроконтроллер МК32-2 (аналог STM32H7);
- восьмиканальный 16-разрядный сигма-дельта АЦП;
- трансивер Ethernet 10BASE-T/ 100BASE-TX с интерфейсом RMII;
- драйвер интерфейсов RS485/RS422;
- четырехканальный цифровой изолятор;



- шестиканальный цифровой изолятор с повышенной пропускной способностью;
- цифровой изолятор USB;
- цифровой датчик температуры;
- драйвер для изолированных источников питания.

Разрабатываемая продукция планируется к созданию на отечественном производстве из отечественных материалов (1-й уровень).

Микроконтроллер МК32-2 содержит 32-битное ядро RISC-V, 2 Мбайт ПЗУ, 1 Мбайт ОЗУ, 32 кБайт ЭППЗУ, а также широкий набор периферийных блоков и интерфейсов (4×8 каналов DMA, 12-бит АЦП; 12-бит ЦАП; 32-разрядные таймеры общего назначения, сторожевой таймер, ШИМ-контроллеры, часы реального времени, датчик температуры, идентификатор серийного номер кристалла, блок криптозащиты: ГОСТ Р 34.12-2015, AES 128/256, интерфейсы: QSPI, SPI, I2C, UART (в том числе, с поддержкой ISO7816), CAN, USB 2.0, Ethernet, GPIO). Микросхема применяется в составе аппаратуры РЗА и АСУ ТП и предназначена сбора, обработки, и последующей передачи информации, поступающих с датчиков, преобразования интерфейсов.

Восьмиканальный 16-разрядный сигма-дельта АЦП применяется для оцифровки аналоговых сигналов с датчиков системы с заданным динамическим диапазоном.

Трансивер Ethernet 10BASE-T/100BASE-TX с интерфейсом RMI и драйвер интерфейсов RS485/RS422 и предназначен для организации линий обмена данными в составе целевой аппаратуры.

Четырехканальный цифровой изолятор, шестиканальный цифровой изолятор с повышенной пропускной способностью, цифровой изолятор USB предназначены для организации гальванической развязки.

Для изготовления кристаллов микросхем предполагается применение технологических процессов АО «Микрон» — КМОП 90 нм, КМОП180 нм, Би-КМОП. Сборку в корпуса предполагается осуществлять на технологических линиях АО «Микрон», с использованием технологических мощностей группы компаний «Элемент».

В настоящее время выполняется изготовление и измерение экспериментальных образцов микросхем. Завершение НИОКР с освоением серийного производства запланировано на 2026 год.

УДК 621.3.049.774

Обеспечение качества комплектов средств проектирования посредством автоматизации и проникновением в процесс разработки на ранних этапах

Гриценко О. В., Антонов Д. С.

ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4,4а
gritsenko@nm-tech.org

Статьей рассматриваются общие подходы к организации процесса разработки комплектов средств проектирования микросхем, позволяющие внедрить автономную автоматизированную платформу оценки их качества. Приведена обобщенная структура платформы с описанием ее компонентов и доступного функционала. Отдельно обозначены решения, позволяющие получить заметные преимущества и ускорение финальной квалификации качества продукта. **Ключевые слова:** библиотеки стандартных элементов; ячейки ввода-вывода; сложнофункциональные блоки; верификация; валидация; автоматизация тестирования; качество.

Описание решаемой проблемы

Качество является первостепенной и ключевой характеристикой любого продукта. Комплекты средств проектирования не являются исключением. А их сложный многокомпонентный состав и темпы современного развития САПР только обостряют проблему обеспечения должного качества. Всеобъемлющее и разностороннее тестирование комплектов средств проектирования — нетривиальная задача, которая чревата долгими итерациями, в случае позднего обнаружения ошибок.

Согласованность процессов разработки комплектов технологических средств проектирования и библиотек компонентов, ускорение этих процессов без потери качества обеспечивается надежной автоматизации, которая независима (влияние пользователя ограничено) и может включаться с ранних этапов разработки.

Предлагаемое решение

Решение указанных проблем достигается внедрением автономной автоматизированной платформы тестирования BELQA и строгим регламентированием процесса планирования и разработки библиотечных решений.

Основные компоненты платформы:

- детальные спецификации всех поддерживаемых представлений САПР для всех типов поддерживаемых комплектов средств проектирования (PDK, библиотеки стандартных элементов, элементов ввода-вывода, блоков памяти, СФ-блоков),
- формальное описание версий комплектов в машинно-читаемом формате (метаданные),
- набор тестирующих программ в соответствии с требованиями, указанными в спецификациях,
- матрица соответствия тестов и представлений САПР для каждого типа комплектов,

- программные средства для автоматического запуска тестов из существующего набора в соответствии с типом и составом САПР представлений компонента, с возможностью распараллеливания независимых запусков, отслеживанием и управлением зависимостей и необходимости перезапуска,
- WEB интерфейс для визуализации и обобщения результатов тестирования, просмотра детальных отчетов и интерактивного управления платформой.

Основой для платформы является составление максимально полной спецификаций для представлений САПР для всех поддерживаемых типов комплектов средств проектирования микросхем. Опираясь на данные спецификации, разрабатываются программы/скрипты для проверки перечисленных конкретных требований представлений САПР. Платформа автоматически, по заданному расписанию (например каждую ночь) получает последний срез данных из системы контроля версий, в соответствии с текущим составом представлений составляет план тестирования, запускает все необходимые тесты (программы/скрипты), обрабатывает полученные результаты и предоставляет доступ к ним через WEB интерфейс.

Таким образом, полностью отсутствует влияние человеческого фактора на выбор необходимых и достаточных тестов на текущей стадии разработки комплектов представлений САПР. Отсутствует возможность вычеркнуть какой-либо тест по желанию разработчика, возможно только исправить ошибку в данных в случае ее наличия. Тестирование по утвержденному стандарту начинается автоматически, как только первые данные появятся в системе контроля версий, использование которой является стандартом для современной разработки. Далее регулярный автоматический перезапуск необходимых тестов сопровождает весь период разработки, что позволяет продолжать работу, постоянно имея представление о текущем качестве продукта. Доступность и открытость Web-отчетов любому вовлеченному в проект разработчику или руководителю обеспечивает прозрачность и отслеживаемость процесса разработки. А также открывает возможности для гибкого покомпонентного распределения работы внутри команды с формализованным надежным подходом к передаче данных от разработчика разработчику (отчеты об успешном прохождении необходимого тестирования). В ideally работающем процессе не требуется резервировать и планировать время на финальное тестирование, так как организация работ предполагает автоматическое тестирование в параллель с разработкой.

Модульный подход к проектированию платформы тестирования (набор тестирующих программ/скриптов) позволяет оперативно наращивать состав тестов в соответствии с запросом развивающихся САПР и спецификаций представлений, унифицировать тесты для различных типов комплектов средств проектирования и обеспечить возможное повторное использование проверенных элементов платформы (например встроенное тестирование в компиляторах памяти).

УДК 621.3.049.774.004.94

Процедура схемного симулятора для определения многих периодических решений при моделировании мемристорных схем

Русаков С. Г., Ульянов С. Л.*НИЦ «Курчатовский институт»,**отделение проблем проектирования в микроэлектронике**124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3*

Обсуждаются особенности применения стандартных процедур схемных симуляторов для моделирования схем с мемристорными приборами. Показаны ограничения базовых вычислительных алгоритмов процедуры моделирования установившихся периодических режимов в этом случае.

Ключевые слова: схмотехническое моделирование; многопериодные режимы; установившийся периодический режим; мемристорные приборы.

Быстрое и успешное развитие теории и практики применения мемристорных приборов расширяет области схмотехнических разработок на их основе. Если приоритетными направлениями исследований являлись новые схмотехнические решения на базе мемристоров для схем памяти, логических схем и схем нейроморфных систем, то в настоящее время внимание специалистов обращено на их применение в аналоговых цепях и радиотехнических интегральных схемах. Преимущества применения мемристоров в схемах для беспроводных систем коммутации и в радиотехнических цепях определяются малой потребляемой мощностью, высокой степенью интеграции и совместимостью со стандартной КМОП-технологией. Особенности приборов создают предпосылки перспективного применения мемристорной схмотехники в области низких частот (1–100 Гц) с сохранением перечисленных преимуществ.

Анализ многопериодных режимов, свойственных для работы таких схем, подерживается известным набором видов моделирования схемных симуляторов. Базовым видом моделирования является расчет установившихся периодических режимов. Такой расчет обеспечивается специализированной вычислительной процедурой во временной области с использованием метода пристрелки или применением алгоритмов метода гармонического баланса для анализа в частотной области.

Разработка ряда моделей, описывающих поведение мемристорных приборов, и технические возможности современных схемных симуляторов позволили включить мемристорные приборы в цикл моделирования электрических характеристик проектируемых схем. Формально виды анализа стали доступными для моделирования мемристорных схем.

Особенностью моделей мемристоров является дополнительное дифференциальное уравнение (ДУ), описывающее поведение мемристорного сопротивления как внутреннего состояния прибора. В ряде случаев это дополнительное ДУ существенно влияет на применение стандартных видов анализа. Так, основной проблемой применения моделей мемристоров при расчетах установившихся периодических режимов является зависимость от начальных условий переменной внутреннего состояния (величины мемристорного сопротивления). Различные

начальные условия могут привести к разным периодическим решениям. Наличие многих периодических решений ограничивает полноту анализа с применением стандартных процедур, а также может стать причиной дополнительных вычислительных проблем.

В связи с этим предлагается расширить набор видов анализа включением процедуры параметрической развертки начальных условий мемристорного сопротивления в диапазоне предельных величин от максимального R_{off} до минимального R_{on} значений. Цель — определить набор периодических решений, соответствующих заданным параметрам входного сигнала.

Приведены примеры применения процедуры при моделировании установившихся периодических режимов в мемристорных схемах разного типа, в том числе при моделировании МС цепей, схем демодуляторов, мостовых схем на мемристорах.

УДК 519.876.5

Проблематика и методы реализации проверки логической эквивалентности в системах автоматизированного проектирования систем на кристалле

Мальшев Н. М.

АО «ЭРЕМЕКС»

117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

malyshev.n@eremex.ru

Создана отечественная система автоматизированного проектирования микроэлектроники и логической оптимизации синтеза исходных кодов микросхем. На ее основе разрабатывается инструмент проверки логической эквивалентности полученных результатов.

Ключевые слова: САПР; HDL; ПЛИС; СнК; АИГ; ЛЕС; КИГ.

Рост размеров кристаллов при разработке СБИС привел к необходимости постоянного развития теории и практики автоматизированного проектирования [1]. В современных САПР проектирования микроэлектроники большое значение уделяется алгоритмам, позволяющим сократить количество базисных элементов, используемых в проектах СБИС, без потери функциональности [2].

Сокращение базисных элементов на кристалле с одной стороны — позволяет сократить площадь кристалла и уменьшить его стоимость. С другой стороны — приводит к усложнению верификации результатов логического синтеза, то есть определению эквивалентности исходного дизайнера с полученным в результате синтеза нетлистом. Сложность возникает из-за изменения алгебры логики при оптимизации схем, так как меняется функциональный путь от входов к выходам относительно исходно заданного пути проекта. Данный путь может состоять не только из комбинаторных узлов, но также и из секвенциальной логики. Последняя, в свою очередь, также добавляет сложность в определении функций булевой логики, так как хранит предыдущие состояния работы элементов схем. Наличие последовательной логики усложняет верификацию результатов синтеза в том числе при функциональной верификации, так как появляется требование верификации схемы по изменению состояний во времени.

В проверке логической эквивалентности (LEC, Logic Equivalence Checking) схем логического пост-синтезного уровня применяется подход, основанный на сопоставлении эквивалентных путей данных. Сопоставление происходит по исходному RTL-коду, представленному на языке Verilog/SystemVerilog и конечному логическому нетлисту, состоящему из технологических Liberty-ячеек. Задача сопоставления решается последовательно двумя этапами. На первом этапе необходима реализация функционального промежуточного транслятора данных между RTL и логическим уровнем. На втором этапе — необходимо определение «комбинаторных конусов» — частей схем, строго содержащих комбинационные элементы, отдельно от секвенциальных [3]. Сопоставление компонентов транслятора и комбинационных конусов логических схем позволяет определить эквивалентные функциональные узлы комбинаторной части, и отдельно — секвенциальные элементы, которые будут сравниваться относительно исходного RTL с полученным

логическим нетлистом. Само сравнение возможно быстро и эффективно провести с использованием конъюнктивно-инверсного представления (КИГ) ориентированного ациклического графа нетлиста и КИГ алгебраических выражений исходного проекта уровня регистровых передач [4]. Выбранный подход в реализации LEC обладает рядом преимуществ — один из которых масштабируемость, простота преобразования выражений в граф с последующим динамическим программированием [5].

В результате выполненных работ был получен модуль проверки логической эквивалентности результатов синтеза для микросхем малой и средней степени интеграции. Данный модуль позволяет значительно сократить время на валидацию результатов синтеза при разработке и отладке работы САПР логического синтеза. Доработка модуля LEC по увеличению количества логических элементов при проверке идет совместно с доработкой модуля логического синтеза, позволяющим на момент написания статьи работать с большими интегральными схемами.

Работы выполнены в рамках проекта разработки САПР Delta Design Simtera IC.

Литература

1. Малышев Н. М., Рыбкин С. В. Особенность разработки САПР для проектирования и верификации конфигурации ПЛИС // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули» (г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019). — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — С. 278—281.
2. Лузин С. Ю. Минимизация булевых функций на основе синтеза распределения термов по индексам // Сб. науч. трудов учебных институтов связи, 1996. — Вып. 162. — С. 27—30.
3. Understanding Logic Equivalence Check (LEC) Flow and Its Challenges and Proposed Solution. URL: <https://www.design-reuse.com/articles/51622/understanding-logic-equivalence-check-lec-flow-and-its-challenges-and-proposed-solution.html> (дата обращения: 01.07.2024).
4. Possani V. N., Lu Y.-S., Mishchenko A., Pingali K., Ribas R. and Reis A. Unlocking fine-grain parallelism for AIG rewriting // Proc. ICCAD'18.
5. Brayton R., Mishchenko A. ABC: An Academic Industrial-Strength Verification Tool // Touili T., Cook B., Jackson P. (eds) // Computer Aided Verification. CAV 2010. Lecture Notes in Computer Science, 2010. Vol. 6174. Springer, Berlin, Heidelberg. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-14295-6_5.

УДК 621.3.049.77

Генерация тестовых параметризованных ячеек интерактивными методами для ускорения процесса верификации PDK 90 нм и ниже

Тюрин А. В., Кириллов М. А., Надин А. С., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н., Загидуллина О. Р.

АО «НИИМЭ»

*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
atyurin@niime.ru*

В работе авторами представлена технология автоматической генерации кода параметризованной ячейки интерактивными методами на основе эскиза топологии и векторов изменений границ примитивов. Это позволяет ускорить процесс создания специализированных тестовых ячеек для верификации библиотек, а также разворачивать тестовые стенды, пригодные для любого PDK, с минимальным участием человека.

Ключевые слова: параметризованная ячейка; QA ячейка; PDK.

Предложенная ранее методология создания параметризованных ячеек (ПЯ) на основе динамических форм [1] позволила разработать библиотеку квалификационных (QA) параметризованных ячеек для верификации основных правил проектирования независимо от уровня технологии. По оценкам инженеров по тестированию, экстраполяция таких ячеек для создания полного комплекта QA библиотеки для тестирования PDK 180–90 нм может покрывать от 60 % до 80 % DRC проверок. Остальная квалификация связана с тестированием сложных, специализированных и приборных правил. Разработка QA ячеек для них по-прежнему происходит в ручном режиме, что, в свою очередь, требует значительных ресурсных затрат. С уменьшением проектных норм (90–28 нм) количество сложных специализированных QA ячеек для разрабатываемого PDK [2] значительно увеличивается, соответственно и возрастает процент ручного труда. Минимизация влияния человеческого фактора при верификации, а также возросший объем разрабатываемых и поддерживаемых PDK, послужили причиной разработки нового подхода для создания специализированных QA ячеек.

Для реализации данной идеи авторами предложен и разработан алгоритм, заключающийся в следующем:

- 1) создается формализованный эскиз топологии специализированной ячейки вручную или на основе уже имеющихся ПЯ;
- 2) для выбранных на эскизе полигонов задается вектор изменения необходимых для тестирования параметров, начальной точкой которого определяется грань базового изменяемого полигона;
- 3) все координаты полигонов в топологии преобразуются в массив параметризованных выражений координатных пар, который специальным образом индексируется;
- 4) для каждого вектора выбираются необходимые точки, которые могут быть затронуты его изменением, к координатным выражениям которых

добавляется учет параметра вектора в зависимости от его направления. Пример преобразования выражения для группы полигонов представлен на рис. 1;

- 5) далее на основании измененных координат создается программный код ПЯ, который может быть скомпилирован и использоваться в дальнейшем для различных режимов тестирования.

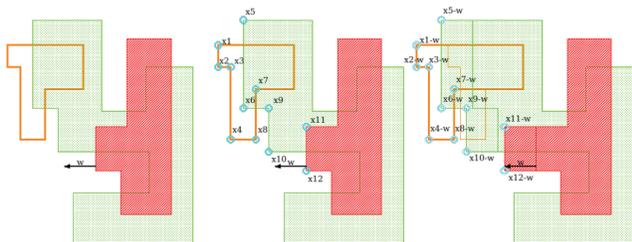


Рис. 1. Преобразование координат полигонов в зависимости от вектора изменяемого параметра

В данном алгоритме пункты 1 и 2 могут быть использованы как в ручном, так и в автоматическом режиме, пункты 3, 4 и 5 полностью автоматические. Для ручного режима работы был реализован специальный интуитивно понятный интерфейс. В итоге разработанный авторами генератор ПЯ значительно упрощает задачу по созданию специализированных QA ячеек и, как следствие, ускоряет процесс верификации. Тестирование программы проводилось для технологии CMOS090HP, в перспективных планах использовать его при разработках PDK CMOS090HP_9M, BCD_6M_40V, HCMOS8RF.

Литература

1. Тюрин А. В., Трифанихина И. Е., Кириллов М. А. и др. Использование принципов динамических форм при разработке параметризованных ячеек топологии PCELL в среде разработки СБИС для 28 нм // Электронная компонентная база и микроэлектронные модули: сборник тезисов научной конференции Форума Микроэлектроника-2021 (г. Алушта, Республика Крым, 03–09 октября 2021) // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7(107). — С. 382–383. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.382.383. EDN CIVVJG.
2. Gavrilov S. V., Zheleznikov D. A., Zapletina M. A. et al. Layout Synthesis Design Flow for Special-Purpose Reconfigurable Systems-on-a-Chip // Russian Microelectronics, 2019. Vol. 48. № 3. P. 176–186. DOI: 10.1134/S1063739719030053. EDN RNC SFA.

УДК 621.3.049

Методология поиска и проверки критических узлов в блоках памяти**Ширяев А. В.***ООО «НМ-Тех»**124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4,4а*

Разработана и успешно внедрена методология поиска критических узлов в блоках памяти и их проверки на соответствие специальным нормам проектирования на этапе разработки топологии микросхемы.

Ключевые слова: память; ОЗУ; SRAM; статическая память с произвольным доступом; автоматизация.

При разработке и проверке блоков памяти инженеры сталкиваются с необходимостью использования различных инструментов от разных компаний, которые не всегда взаимодействуют друг с другом, что осложняет процесс проектирования схемы. Поиск и проверка критических узлов в блоках памяти представляют собой одну из ключевых и наиболее трудоемких задач в процессе проектирования. Внедрение формализации и автоматизации этого процесса значительно улучшит и ускорит эффективность разработки блоков памяти.

На этапе схемотехнического проектирования блока памяти с помощью функционального анализа (моделирование) определяется иерархический список критических узлов схемы и сохраняется в определенном формате. Посредством разработанных программных решений, полученный список критических узлов транслируется напрямую в топологию схемы, где они проверяются специальными правилами проверки топологии (DRC) по всей иерархии микросхемы.

Данная методология представлена в виде программного пакета, который позволяет провести необходимые операции за одну итерацию, устраняя необходимость в последовательных многоэтапных манипуляциях. Программное решение успешно протестировано в ходе разработки и проверки блоков памяти для технологий с разрешением от 250 до 130 нм.

Литература

1. Угюмов Е. П. Глава 5. Запоминающие устройства // Цифровая схемотехника. — 3 изд. — БХВ-Петербург, 2010.
2. Rathi Neetu, Kumar Anil, Gupta Neeraj, Singh Sanjay Kumar. A Review of Low-Power Static Random Access Memory (SRAM) Designs // 2023 IEEE Devices for Integrated Circuit (DevIC).
3. Preston R. P. 14: Register Files and Caches. The Design of High Performance Microprocessor Circuits. IEEE Press, 2001.

УДК 004.4 + 621.382

Миграция топологии IP под управлением электрической схемы

Калашников В. С., к. т. н., Розенфельд В. П., Керре А. Л., Смирнов Ю. Г.,
Сотников М. А., к. т. н., Семенов М. Ю., к. т. н.

ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а
info@nm-tech.org

Для ускорения перевода топологии на отечественный техпроцесс, и расширения возможностей ее повторного использования, разработан маршрут миграции топологии под управлением электрической схемы. Проанализированы возможности маршрута для различных классов топологии, и применимость отдельных алгоритмов для решения смежных задач.

Ключевые слова: сжатие; модификация; топология; граф ограничений; экстракция; сопоставление; изоморфизм.

В целях ускорения перевода производства на отечественный технологический базис, расширения возможностей повторного использования топологии различных видов ячеек, используются системы миграции топологии [1, 2]. Существуют различные варианты маршрутов миграции, различающиеся по классу модифицируемой топологии (плоская, иерархическая, стандартные ячейки), вносимым изменениям (добавление/удаление слоев; коррекция топологии для приведения в соответствие с целевыми КТО, модификация топологии в целях изменения параметров и типа используемых приборов, добавления/удаления части схемы). Задача автоматической миграции топологии под управлением целевой электрической схемы возникает:

- при смене технологического базиса;
- добавлении новых ячеек;
- обновлении топологии на основе оптимизированной схемы.

Общий маршрут для решения этой задачи, реализованный в подсистеме миграции топологии состоит из следующих этапов:

- 1) восстановление схемы из топологии (экстракция приборов, цепей);
- 2) преобразование исходной топологии в базис целевой технологии;
- 3) сопоставление восстановленной и целевой схем, нахождение различий;
- 4) приведение топологии в соответствие целевой схеме под контролем графа ограничений.

Особенностью маршрута является наличие шагов 1 и 3, а также модификация шага 4 по сравнению с классическим сжатием (коррекцией) топологии, описанным в [2].

Электрическая схема представляется в виде двудольного графа. Для построения таблицы соответствия приборов и цепей между целевой и восстановленной схемами используется алгоритм поиска изоморфизма графов, включающий в себя расстановку пометок вершин (т.н. раскраску графа), и вызова процедуры проверки изоморфизма с учетом раскраски. При сопоставлении двух схем сначала строится таблица структурного соответствия, не учитывающая параметры приборов, а затем, при нахождении различий между целевой и восстановленной схемами, формируется задание на последующую коррекцию топологии.

Различия между восстановленной и целевой схемами, которые могут быть обработаны представленным маршрутом, включают в себя:

- различия в типах приборов (например изменения порогового напряжения транзисторов);
- различия в геометрических параметрах приборов (например l , w — длина и ширина канала транзистора);
- различия в количестве «пальцев» расщепленных транзисторов (более сложный случай изменения в параметре w).

Найденные несоответствия корректируются на шаге 4 предложенного маршрута алгоритмом коррекции топологии под управлением графа ограничений. Особенность используемого алгоритма коррекции — отсутствие разрывов и пересечений проводников, которые могут появиться при обычном масштабировании топологии.

Предлагаемый маршрут позволяет существенно (в 8–10 раз) ускорить разработку топологии в соответствии с целевой электрической схемой и с соблюдением правил проектирования. Также, разработанные в ходе реализации данного маршрута методы и алгоритмы позволяют проводить сравнение схем большой размерности (порядка 1 млн транзисторов) с высоким быстродействием и в перспективе могут применяться для решения смежных задач, например, проверки соответствия топологии и схемы (LVS).

Литература

1. Керре А.Л., Сотников М.А., к.т.н., Розенфельд В.П., Смирнов Ю.Г. Подсистема миграции иерархических СФ-блоков // Тезисы доклада, форум «Микроэлектроника-2023».
2. Розенфельд В.П., Сотников М.А., Топузов И.Г., Улуханов Э.А., Широ Е.Г. Система сжатия и миграции топологии стандартных ячеек // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем — 2005. Сборник научных трудов / Под общ. ред. А.Л. Стемповского. — М.:ИППМ РАН, 2005.

УДК 621.382, 658.512.2

Маршрут проектирования СВЧ интегральных схем на основе программного обеспечения с открытым исходным кодом

Шеерман Ф. И., к. т. н., Ковалев В. В., Хайрулин Д. Е., Помазанов А. В.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
fish@tusur.ru*

Рассмотрены варианты построения маршрута проектирования СВЧ интегральных схем с использованием программных продуктов с открытым исходным кодом (QUCS-S, KLayout). Приведен пример проектирования МИС усилителя X-диапазона по данному маршруту.

Ключевые слова: САПР; МИС усилитель; X-диапазон; KLayout; QUCS-S.

Разработка интегральных схем — сложный и трудоемкий процесс, требующий от разработчика большого опыта и знаний. Проектирование принципиальной схемы и топологии сейчас выполняется в специализированных САПР, которые, как правило, на выходе выдают чертежи фотошаблонов в формате GDS. На рынке представлено всего несколько коммерческих САПР, обеспечивающих полный цикл разработки ИС: Cadence, Synopsys и Siemens EDA (ранее Mentor Graphics). Стоимость приобретения и внедрения таких САПР очень высока. Кроме того, опыт последних лет показывает, что зависимость от импортных САПР в такой критически важной отрасли как микроэлектроника просто недопустима. Адаптировать САПР под отечественные фабрики и техпроцессы не всегда возможно без помощи производителя САПР, т. к. используются закрытые форматы и инструменты, доступ к которым ограничен.

Таким образом, актуальным становится разработка собственных программных пакетов для проектирования СВЧ интегральных схем. Учитывая, что лидеры отрасли потратили несколько десятков лет на разработку специализированных алгоритмов, моделей и численных методов, решить эту проблему в короткие сроки, которые требует отечественная электронная промышленность, становится практически невыполнимой задачей. Одним из возможных подходов в таких условиях может стать использование ПО с открытым исходным кодом. Уже давно на практике используются такие продукты, как Qucs-S [1] для моделирования принципиальных схем и KLayout [2] для разработки топологии. Эти программные продукты выполнены на хорошем научно-техническом уровне и вполне могут стать основой для маршрута проектирования СВЧ интегральных схем.

Qucs-S — это программа моделирования схем, основанная на симуляторе схем Qucs. Буква «S» обозначает SPICE. Целью проекта Qucs-S является использование свободно распространяемых ядер моделирования схем (Ngspice, Qucsator, Xyce) с унифицированным графическим интерфейсом на основе инструментария Qt6. Он объединяет мощь SPICE и простоту графического интерфейса Qucs. Однако SPICE ядро моделирования плохо подходит для разработки радиочастотных и СВЧ-схем. Для этих целей необходимо использовать старое ядро QucsatorRF, в котором имеются необходимые модели микрополосковых линий, нелинейные модели транзисторов и других компонентов. В текущей реализации Qucs-S это ядро пока не работает, что создает определенные трудности.

Другой проблемой является отсутствие целого ряда моделей компонентов, которые имеются в коммерческих САПР и используются отечественными фабриками и разработчикам.

Наиболее важной и ответственной задачей является проектирование топологии ИС, которая решается в специализированных топологических редакторах. Редактор топологии KLayout с открытым исходным кодом закрывает большую часть задач по разработке топологии ИС, содержит инструменты для DRC/LVS проверок, имеет возможность создания библиотек и параметризованных топологических ячеек, поддерживает широкий спектр форматов файлов: GDS, DXF, LEF/DEF, MEBIS и может являться рабочей альтернативой в небольших проектах.

В рамках настоящей работы решалась задача по адаптации редактора KLayout под техпроцесс рНЕМТ 0,25 мкм фабрики «Светлана-Рост». В ходе чего был разработан комплект всех необходимых конфигурационных файлов: файлы настройки слоев, топологические ячейки основных компонентов МИС (транзисторы, контактные площадки, конденсаторы, резисторы, спиральные катушки индуктивности, компоненты микрополосковых линий), файлы DRC для проверки на нормы проектирования и др. Все топологические ячейки были реализованы в виде параметризованных ячеек на языке Python, что позволяет автоматически генерировать многослойную топологию каждого компонента в соответствии с заданными параметрами. Для демонстрации и проверки возможностей редактора была разработана топология однокаскадного МШУ на X-диапазон (рис. 1) При этом все DRC проверки также выполнялись в редакторе по настроенным правилам в соответствии с документацией фабрики.

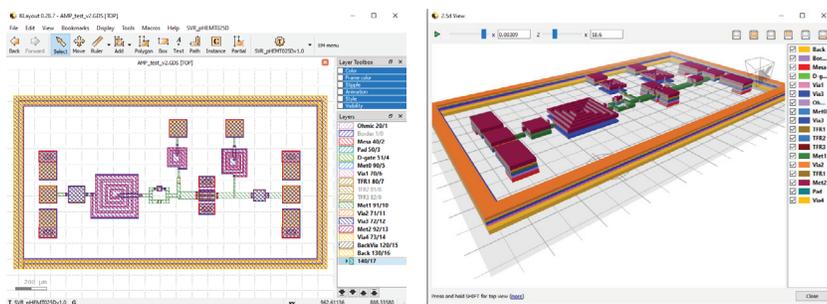


Рис. 1. Разработанная топология МИС МШУ в редакторе KLayout

Другой важной задачей, которую необходимо решать на финальном этапе разработки топологии СВЧ МИС, является проведение электромагнитного моделирования. Для этих целей чаще всего применяется метод моментов. Следуя парадигме применения свободно распространяемого ПО, были проанализированы возможные варианты ЭМ симуляторов. Наиболее подходящим вариантом оказалась бесплатная версия популярного симулятора на основе метода моментов Sonnet Lite [3]. Бесплатная версия ограничена объемом оперативной памяти в 64 МБ и количеством металлических слоев 2+ GND. Эти ограничения не позволят промоделировать топологию МИС целиком, однако возможности достаточны для проведения

анализа отдельных компонентов. Задача взаимодействия KLayout и Sonnet решалась при помощи файлов. В KLayout на языке Python был реализован макрос, который разбирал топологию компонента и генерировал текстовый файл задания для Sonnet в формате *.son, затем в фоновом режиме происходил запуск ЭМ-моделирования и результаты в виде S-параметров записывались в *.s2p файл. Другой написанный макрос разбирал *.s2p файл и отображал данные в виде графиков (рис. 2).

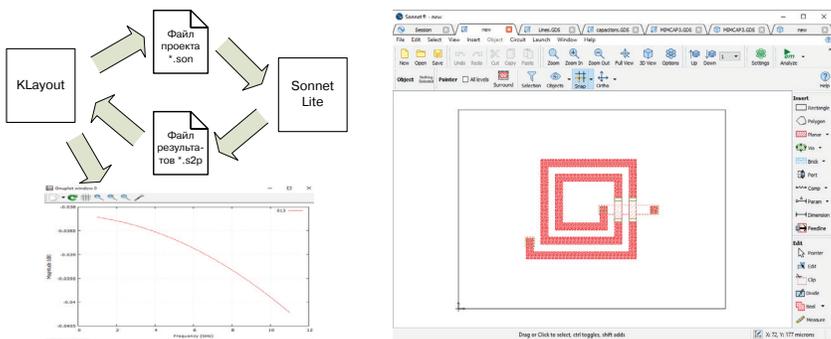


Рис. 2. Автоматическая генерация топологии для ЭМ-моделирования в Sonnet Lite

Такой подход показал возможность проведения ЭМ анализа отдельных компонентов МШУ, не прибегая к дорогостоящим коммерческим продуктам, и позволил отработать основные механизмы интеграции ЭМ-симулятора в редактор KLayout. В дальнейшем ЭМ симулятор Sonnet будет заменен на продукт отечественной разработки.

Таким образом, в ходе работы была продемонстрирована возможность применения свободно распространяемого ПО на этапе разработки схемы и топологии СВЧ МИС.

Литература

1. Qucs-S. URL: <https://ra3xdh.github.io>.
2. KLayout Layout Viewer And Editor. URL: <https://www.klayout.de>.
3. Sonnet Lite. URL: <https://www.sonnetsoftware.com/products/lite>.

УДК 621.3.011.7

Методы синтеза топологии СВЧ монолитных интегральных схем

Сальников А. С., Билевич Д. В., Степанов В. И., Попов А. А., Калентьев А. А.
ООО «500m Технолоджиз»
634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 147
andrei.salnikov@500m.tech

В докладе будет представлен подход к синтезу топологии СВЧ монолитных интегральных схем на основе материалов группы A^3B^5 . В рамках подхода рассмотрены методы, примененные для синтеза топологии, а также алгоритм для обеспечения симметрии и сегментация линий. Будет представлен ряд СВЧ-устройств, на которых опробован алгоритм.

Ключевые слова: синтез топологии; СВЧ монолитная интегральная схема; ступенчатый аттенюатор; ступенчатый фазовращатель; коммутатор.

Синтез топологии — это получение топологии интегральной схемы по известной электрической схеме и топологии отдельных элементов. Для цифровых кремниевых интегральных схем синтез топологии (физический синтез) является общепринятой практикой. Синтез аналоговых схем для кремниевых технологии переживает сейчас период значительного интереса [1]. Аналоговые схемы отличаются от цифровых тем, что топология в большей степени влияет на электрические характеристики. В СВЧ-диапазоне это еще более выражено из-за электромагнитного влияния элементов друг на друга. Разработка синтеза топологии дополняет синтез электрических схем [2], образуя полный цикл автоматизированного синтеза топологии, что значительно повышает производительность труда разработчиков СВЧ монолитных интегральных схем (МИС).

Синтез СВЧ МИС на материалах группы A^3B^5 отличается от принятых в кремнии схема подходов к синтезу: 1) существенным влиянием соединительных линий на электрические характеристики, особенно в миллиметровом диапазоне; 2) необходимостью выполнить межсоединения преимущественно в одном слое; 3) невозможность пересечения элементов межсоединениями. Обычно синтез разделяют на два этапа: размещение (определение координат отдельных элементов) и трассировка (определение положения межсоединений). Для применения применяют две группы методов: детерминированные и оптимизационные. В качестве целей оптимизации используются площадь схемы, соотношение длины и ширины кристалла, симметрия схемы, наложение элементов, ухудшение электрических параметров из-за влияния паразитных параметров соединений [3] и другие.

В настоящий момент наша научная группа в рамках общего подхода разрабатывает методы размещения и трассировки, применимые к СВЧ МИС на основе материалов A^3B^5 , планируется реализация методов в специализированном программном обеспечении. Размещение выполняется последовательно в несколько этапов. Первый шаблон генерируется на основе знаний об электрической схеме и ее типового шаблона. Глобальное размещение выполняется на основе генетического алгоритма (хромосома задает координаты элементов). Детальное размещение (без изменения относительного положения элементов) выполняется алгоритмом имитации отжига с эффектом памяти. Его суть состоит в том, что выбор направления

перемещения элемента выполняется стохастически, однако вероятности пропорциональны успеху данного действия (увеличению значения целевой функции) на предыдущих этапах. Также в алгоритмы добавлена возможность синтеза симметричной топологии (путем синтеза половины схемы и отзеркаливания), а также сегментация линий передачи для достижения большей компактности. Для трассировки использовался модифицированный A* алгоритм. Отличие от стандартного алгоритма заключается в запрете движения по диагонали и штрафе на изгиб линии. В данный момент работа алгоритмов продемонстрирована для секций ступенчатого аттенюатора и ступенчатого фазовращателя [4], коммутатора [5], в ближайшее время планируются эксперименты по синтезу усилительного каскада.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-91-06401.

Литература

1. Chen H. et al. Challenges and opportunities toward fully automated analog layout design // *Journal of Semiconductors*, 2020. Vol. 41. № 11. P. 111407.
2. Калентьев А.А. и др. Интеллектуальная САПР «Смекалец»: быстрый и простой синтез СВЧ интегральных схем // *Электроника: Наука, технология, бизнес*, 2022. — № 3 (214). — С. 76–81.
3. Aktuna M., Rutenbar R. A., Carley L. R. Device-level early floorplanning algorithms for RF circuits // *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1999. Vol. 18. № 4. P. 375–388.
4. Сальников А. С. и др. Подход к автоматизированному синтезу схем и топологий СВЧ интегральных схем на примерах секций аттенюатора и фазовращателя // 9-я научная конференция «ЭКБ и электронные модули»: Сборник тезисов. Сириус, 9–14 октября 2023 г. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. — С. 349–350.
5. Сальников А. С. и др. Реализации симметрии и сегментированных линий в алгоритме синтеза топологии СВЧ-коммутаторов // *Сборник статей XIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*, 2024. — С. 248–252.

УДК 004.415.2

САПР для реализации сквозного маршрута проектирования современных типов корпусов, трехмерных микросборок, многокристалльных модулей и систем в корпусе, включая применение технологии проводного монтажа**Федоткин А. С.***ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»**119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24**fedotkin_a@ineum.ru*

Рассмотрены современные технологии корпусирования микросхем и типовые маршруты проектирования для технологии проводного монтажа и с применением коммутационной платы корпуса. Определены задачи для реализации необходимой функциональности в САПР проектирования корпусов сложно-функциональных микросхем.

Ключевые слова: САПР; СБИС; технологии корпусирования микросхем; проводной монтаж; подложка корпуса.

Современные технологии корпусирования микросхем можно разделить на два направления: проводной монтаж (wire bonding) и применение подложки (многослойной коммутационной платы). Как правило, для сложнфункциональных микросхем и систем в корпусе применяют технологии с использованием коммутационной платы, такие как: flip-chip (монтаж кристалла на коммутационную плату корпуса), чиплеты на подложке или кремниевом интерпозере, CoWoS (Chip-on-Wafer-on-Substrate) со сквозными отверстиями TSV (through-silicon via), EMIB (монтаж кристалла на кремниевый интерпозер, встроенный в подложку), Intel Foveros (высокопроизводительная 3D сборка), FOCoS (Fan Out Chip On Substrate) и другие, а также их комбинации. Проводной монтаж чаще применяют для небольших микросхем из-за необходимости размещения выводов только по периферии кристалла, хотя существуют и довольно сложные системы в корпусе, спроектированные с применением проводного монтажа. Возможны также различные вариации/комбинации проводного монтажа и применения подложки корпуса.

Технологии проводного монтажа и на основе коммутационной платы корпуса требуют принципиально разного подхода при разработке корпуса микросхемы и, следовательно, маршрут проектирования и требуемые средства проектирования тоже будут различны. В случае проводного монтажа необходимо сформировать корректный технологический файл для bonding машины, иметь средства создания модели корпуса для заданного кристалла, формирования, визуализации и проверки диаграмм проводного монтажа на соответствия технологическим ограничениям проектирования. В случае разработки корпуса микросхемы по технологии с применением многослойной коммутационной платы необходимо выполнить топологическое проектирование этой платы и выгрузить топологию в формате GERBER для производства. Средства проектирования должны обеспечить разработчику визуализацию разрабатываемой платы, автоматизацию трассировки с учетом норм и ограничений проектирования в режиме реального времени, моделирование.

Наиболее известные зарубежные САПР для корпусирования микросхем, позволяющие выполнить проектирование в том числе систем в корпусе по любой технологии с применением подложки или проводного монтажа, это Cadence Allegro advanced IC package designer (SIP) и Siemens Xpedition Package Designer. Однако, зарубежные САПР с каждым годом все сложнее приобретать и использовать в России из-за отсутствия официальных дистрибьютеров и поддержки. В ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» ведется разработка собственных САПР для корпусирования сложнотехнологических микросхем САПР «СРК», а также программно-аппаратных комплексов, но на текущий момент поддержаны только технологии с применением подложки корпуса. Планируется расширение функциональности разрабатываемых САПР для реализации сквозного маршрута проектирования современных типов корпусов, трехмерных микросборок, многокристальных модулей и систем в корпусе, включая применение технологии проводного монтажа. Результатом работы станет добавление модулей редактора корпуса, менеджера диаграмм проводного монтажа и проверки правил проектирования, средства визуализации элементов топологии кристалла из формата GDSII (модуль GDS Viewer) с возможностью интеграции с САПР «СРК» через форматы файлов и центральную библиотеку компонентов.

Литература

1. Бычков И. Н., Ломако С. Г. САПР проектирования коммутационных плат корпусов // Наноиндустрия, 2019. Спецвыпуск № 89. — С. 57–59.
2. Тарасов И. Е., Мирзоян Д. И., Лобанов И. Н., Федоткин А. С. Архитектура САПР для проектирования корпусов СБИС // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии, 2022. — № 1. — С. 13–18.

УДК 621.3.049

Разработка САПР аналоговых и СВЧ-схем, планы и задачи**Иванова Е. Н.***АО «НПО «КИС»**107078, г. Москва, ул. Новорязанская, 8*

Разработана Дорожная карта по разработке САПР для микроэлектроники.

В карте учтены компетенции и возможности команд разработчиков в России на текущий момент, и в соответствии с ними разработан план мероприятий, который позволит запланировать и реализовать раз работку инструментов САПР различными группами разработчиков.

Ключевые слова: САПР СБИС; проектирование аналоговых ИС; проектирование СВЧ-схем.

На данный момент остро встал вопрос об импортозамещении решений в области САПР микроэлектроники.

Минпромторг РФ, Департамент цифровых технологий активно поддерживает данную тематику с 2022 года.

Поставлена задача на создание дорожной карты по разработке САПР микроэлектроники и уже идут работы по разработке отдельных инструментов.

Согласно плана мероприятий, в 2024 году ставятся работы по разработке САПР для цифровых, аналоговых и СВЧ-схем, проработана кооперация со-исполнителей, и определен функционал, который будет по итогам работ.

Состав работ по САПР Аналоговых ИС:

1. Среда схемотехнического проектирования ИС.
2. Программа схемотехнического моделирования ИС.
3. Программа отображения и анализа результатов моделирования ИС.
4. Топологический редактор для создания топологии аналоговых ИС.
5. Программа верификации топологии на соответствие нормам конструктивно-технологических ограничений ИС.
6. Программа проверки соответствия схемы электрической принципиальной топологии ИС.
7. Программа экстракции паразитных параметров элементов аналоговых ИС:
 - для этапа схемотехнического проектирования дорабатываются инструменты САПР СИМИКА;
 - для этапа топологического проектирования инструменты разрабатываются заново;
 - для совместимости с КСП отечественных фабрик проводится интеграция с программой создания топологии и верификации интегральных схем — KLayout;
 - для задач тестирования требуется PDK CMOSF8 0,18 мкм компании АО «НИИМЭ», разработанный в рамках проекта ФПИ «Обсидиан».

Состав работ по САПР СВЧ-схем:

1. Среда проектирования.
2. Схемотехнический редактор.
3. Схемотехнический симулятор:

- анализ по постоянному току;
 - линейный и шумовой анализ;
 - анализ S-параметров (SP-анализ);
 - нелинейный анализ во временной области (метод переходных процессов);
 - анализ методом гармонического баланса.
4. Топологический редактор.
 5. Библиотека базовых элементов и PDK.
 6. Модуль создания параметризованных ячеек.
 7. ЭМ симулятор:
 - 2D/3D квазистатическое моделирование (MoM);
 - 2,5D электродинамическое моделирование (MoM).
 8. Модуль параметрической оптимизации.
 9. Специальные инструменты проектирования.
 10. Сопряжение с САПР Аналог и САПР ГАММА.
- Работы запланированы на 2024–2026 годы.

УДК 621.3.049

Методика оценки локальной температуры мощных компонентов на кристалле с использованием тепловой FEM модели подложки

Али А. З.

ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4,4а

Разработана тепловая FEM модель ИС Мостового драйвера, позволившая методами SPICE получить карту распределения температур по подложке. Выбрано расположение температурных датчиков и определены области амплитуд и длительностей токов, не приводящие к отключению устройства по перегреву.

Ключевые слова: h-bridge; FEM-модель; силовой транзистор; температурный датчик.

Работа силовых интегральных микросхем связана с большим удельным тепловыделением, приводящим к значительному перегреву [1]. Превышение предельных рабочих температур может вызывать следующие проблемы:

- 1) физическое разрушение структур ИС;
- 2) нестабильная работа устройства;
- 3) снижение долгосрочной надежности в следствие эффекта электромиграции [2].

Преимущественно перегрев кристалла возникает в области канала силового транзистора, температуру которого необходимо тщательно контролировать, принимая меры по недопущению работы транзистора за пределами допустимого диапазона температур. Основным способом защиты силового ключа является температурный датчик [3]. С точки зрения обеспечения надежности организации такого вида защиты критическим является расположение этого датчика. Также обезопасить устройство можно, определив для пользователя область амплитуд и длительностей токов, в которой устройство будет работать без превышения предельных температур.

Сложность заключается в том, что температура кристалла имеет значительный градиент из-за термодинамических свойств кремниевой подложки, поэтому в рамках проекта Мостового драйвера (H-bridge) для решения указанных проблем по методу конечных элементов (FEM) разработана тепловая модель подложки с основанием корпуса. Данная модель собрана в среде разработки аналоговых схем, так как она является доступной, привычной для схемотехника, и достаточной для моделирования необходимых термодинамических эффектов.

С помощью разработанной FEM модели получены распределения температур по подложке, выбрана архитектура тепловой защиты продукта H-bridge, определены 1) расположение защитных датчиков температуры; 2) области стабильной работы по амплитуде и длительности тока нагрузки.

Литература

1. Pang Li. Thermal Design of Power IC Chip Based on Icepak. Applied Mechanics and Materials, 2013. 456. P. 278–281. 10.4028/www.scientific.net/AMM.456.278.

2. Hieu Nguyen, Salm C., Krabbenborg Benno, Weide-Zaage K., Bisschop J., Mouthaan A.J., Kuper F.G. Effect of thermal gradients on the electromigration life-time in power electronics // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability — IEEE Trans Device Mater Relia, 2004. P. 619–620. DOI: 10.1109/REL-PHY.2004.1315418.
3. Han Y., Zhai M., Zhou J. A thermal protection module for automotive integrated circuits // Modern Physics Letters B, 2017. 31(19-21), 1740097.

УДК 621.3.049.771.14

Исследование и анализ характеристик стандартных цифровых элементов в диапазоне криогенных температур на примере технологии КМОП 180 нм

**Ильин С. А., Капустин А. В., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., к. т. н.,
Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.**

АО «НИИМЭ»

*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
dkopeikin@niime.ru*

В работе проводятся анализ и оценка изменений характеристик стандартных цифровых элементов в диапазоне криогенных температур, полученных на основе уточненных Spice моделей, спроектированных при помощи САПР приборно-технологического моделирования.

Ключевые слова: криогенные КМОП; низкотемпературная электроника; библиотеки стандартных цифровых элементов; DDK.

Низкотемпературная электроника широко применяется в аппаратуре научного, аэрокосмического и специального назначения. Для эффективного функционирования маломощающих усилителей микроволнового излучения, специальных мультиплексоров, инфракрасных и рентгеновских датчиков и детекторов и т. д., необходимо обеспечить их корректную и предсказуемую работоспособность в диапазоне криогенных температур. Возможности аппаратуры обычного температурного диапазона в таких условиях существенно ограничены, что повышает актуальность исследований в области, разработки и всестороннего развития средств проектирования СБИС под криогенный температурный диапазон, обеспечивая развитие полупроводниковой отрасли РФ [1].

Фундаментальная причина повышенного интереса к проектированию аппаратуры, выполняющей задачи в режимах криогенных температур, заключается в качественном улучшении ее эксплуатационных характеристик, что в свою очередь является результатом комбинации эффектов, возникающих в элементной базе: как правило, транзисторы полевого типа демонстрируют повышенный коэффициент усиления и быстродействия, уменьшаются токи утечки, а также паразитные сопротивления и емкости в межсоединениях [2]. При применении специальных методов проектирования конечные изделия обладают пониженным уровнем шума.

Целью исследования является анализ основных характеристик стандартных цифровых элементов в диапазоне криогенных температур. Исследование проведено в базе отечественной полупроводниковой технологии КМОП 180 нм на основе схмотехнического моделирования с применением базовых и Spice моделей элементной базы для диапазона криогенных температур, спроектированных при помощи САПР приборно-технологического моделирования.

На рис. 1 представлены результаты определения по критерию максимального быстродействия, соотношения параметров W_p/W_n транзисторов базового логического элемента, выполняющего функцию инвертора для планируемого диапазона рабочих температур. Для диапазона от -60 до 25°C расчет проводился на Spice моделях базовой технологии (H8D), далее строилась линия тренда. Спроектированные

под криогенный диапазон (Н8К) модели применялись для расчета на полном диапазоне температур. Разница в расчетных точках составляет более 5 %.

Анализ изменения быстродействия и потребления на примере кольцевого генератора в диапазоне криогенных температур представлен в табл. 1. Показано изменение параметров кольцевого генератора при переходе в диапазон температур от -200 до -60 °С. Из результатов эксперимента видно, что при приближении к границе исследуемого температурного диапазона быстродействие кольцевого генератора увеличивается на ~45 %, а потребляемая мощность на ~34 %.

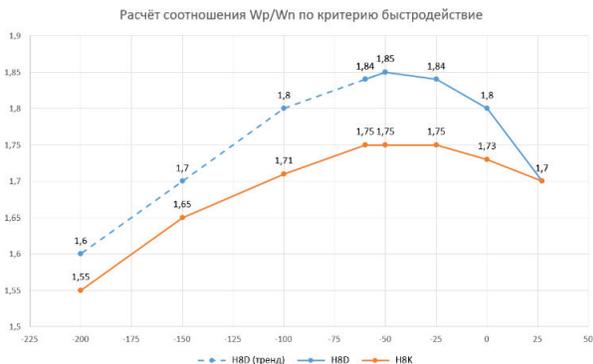


Рис. 1. Определение соотношения W_p/W_n транзисторов для базового логического элемента инвертор

Таблица 1. Изменение основных параметров кольцевого генератора при переходе в диапазон криогенных температур

	Температура, °C			
	-60	-100	-150	-200
Быстродействие	1,10	1,22	1,34	1,45
Потребляемая мощность	1,11	1,19	1,28	1,34

По результатам определения соотношения W_p/W_n разработана макетная библиотека стандартных цифровых элементов. Для комплексной оценки поведения более сложных узлов в диапазоне криогенных температур проведен синтез комплекта блоков из наборов ISCAS'85/89. Методика проведения эксперимента представлена в работе [3]. В среднем отмечается повышение быстродействия при температуре -200 °C на ~33 %.

Полученные результаты подтверждают необходимость разработки специальной конструкторско-технологической платформы проектирования СБИС в базе отечественной КМОП-технологии 180 нм для диапазона криогенных температур. В состав платформы должны входить: библиотеки стандартных цифровых элементов, интерфейсных элементов ввода вывода, компиляторы блоков памяти ОЗУ/ПЗУ, СФ-блоки [4, 5, 6]. Проведенное исследование заложило фундамент для разработки такой платформы.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: В 2-х частях. Часть 2. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2004. — 536 с. EDN PZDVBT.
2. Gutierrez-D. Edmundo A., Deen J. M., Claeys C. L. Low Temperature Electronics: Physics, Devices, Circuits, and Applications // Academic Press, 2001. 964 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-310675-9.X5000-2.
3. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., Шипицин Д. С. Сравнительный анализ параметров стандартных цифровых элементов на примере библиотек в базе технологии КМОП 28 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S4 (99). — С. 268–271. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.268.271. EDN WMT-VFE.
4. Ильин С. А., Кочанов С. К., Ласточкин О. В. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования СБИС на базе отечественной технологии КНИ 90 нм // Электронная компонентная база и микроэлектронные модули: сборник докладов 3-й международной научной конференции в рамках Форума Микроэлектроника-2017 (г. Алушта, Республика Крым, 2–7 октября 2017) // Наноиндустрия, 2018. — № S (82). — С. 365–368. DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.365.368. EDN XQVMYH.
5. Ильин С. А., Ласточкин О. В., Надин А. С. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования радиационно стойких СБИС на базе отечественной технологии КМОП 90 нм на основе RHVD-методологии // Наноиндустрия, 2019. — № S(89). — С. 254–257. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.254.257. EDN UPRERI.
6. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования СБИС на базе отечественной технологии КМОП КНИ 180 нм // Электронная компонентная база и микроэлектронные модули: сборник тезисов 9-й научной конференции в рамках Российский форума Микроэлектроника-2023 (Парк науки и искусства «Сириус», 9–14 октября 2023) — М.: ТЕХНОСФЕРА; 2023. — С. 343–345. EDN OMEAOТ.

УДК 621.382

Исследование температурных характеристик МОП-транзисторов отечественной технологии 180 нм при криогенных температурах

Шипицин Д. С. к. ф.-м. н.¹, Власов И. А.², Ласточкин О. В.¹, к. т. н.,
Матвеев Н. Н.¹, Осыкин А. А.¹, Потупчик А. Г.¹

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

dshpitsin@niime.ru, olastochkin@niime.ru, nmatveev@niime.ru, aosykin@niime.ru,
apotupchik@niime.ru.

²АО «Центральный научно-исследовательский институт «ЦИКЛОН»

107207, г. Москва, Щёлковское ш., 77

В ходе работы был разработан измерительный стенд для исследования элементной базы при криогенных температурах. Проведены измерения элементной базы при температурах 65 К–298 К. В работе рассматривается изменение температурных характеристик МОП-транзисторов и пассивных приборов.

Ключевые слова: измерения; КМОП; криогенные температуры; неполная ионизация примеси.

Введение

Современная разработка интегральных схем (ИС) не возможна без использования компьютерных средств проектирования, частью которых являются SPICE-модели приборов в составе библиотеки элементов данной ИС. Если рабочая температура ИС достигает криогенных температур, то и SPICE-модели приборов для нее должны быть получены в соответствующих условиях. Наиболее благоприятна ситуация, когда модели приборов достоверны в широком диапазоне температур. В данной работе исследуются характеристики приборов в диапазоне температур от комнатной до температуры кипения жидкого азота.

МОП-транзисторы

Измеренные ВАХ n-МОП и p-МОП-транзисторов $W/L = 10 \text{ мкм}/0,18 \text{ мкм}$ показаны на рис. 1, 2. Данные измерений показаны в сравнении с данными моделирования TCAD этих структур в таких же условиях. Принимая во внимание существование технологического разброса в характеристиках приборов, данные TCAD-моделирования были смещены на величину ΔV_{th} : -39 мВ для n-МОП и $-60,5 \text{ мВ}$ для p-МОП — и нормированы к уровню тока при температуре $T = 24^\circ\text{C}$ и напряжении на затворе $V_g = 1,8 \text{ В}$.

При приближении к криогенным температурам поведение прибора начинает отличаться от данных моделирования. На графиках зависимости линейного тока от температуры (рис. 1б, 2б) это отличие выглядит как постепенное уменьшение скорости роста тока при уменьшении температуры, тогда как модель продолжает гиперболическую зависимость $I_d(T)$. Подобное поведение прибора связано с увеличением последовательного сопротивления стока и истока МОП-транзистора по причине возникновения эффекта вымораживания или неполной ионизации примеси в LDD областях приборов. Теоретическая основа эффекта неполной ионизации примеси была ранее рассмотрена в статье [1].

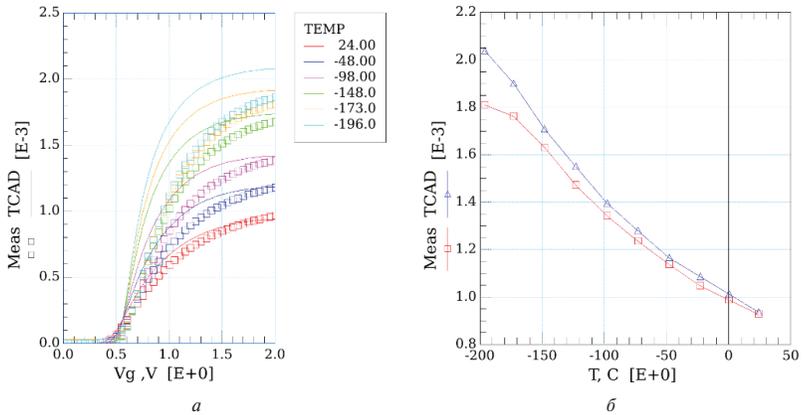


Рис. 1. а) Проходные характеристики n канального МОП-транзистора: символы — TCAD-моделирование, линии — измерения; б) зависимость параметра IDL от температуры, где $IDL = Id @ Vd = 0,1 \text{ В}, Vg = 1,8 \text{ В}$: синяя линия — TCAD-моделирование, красная линия — измерения

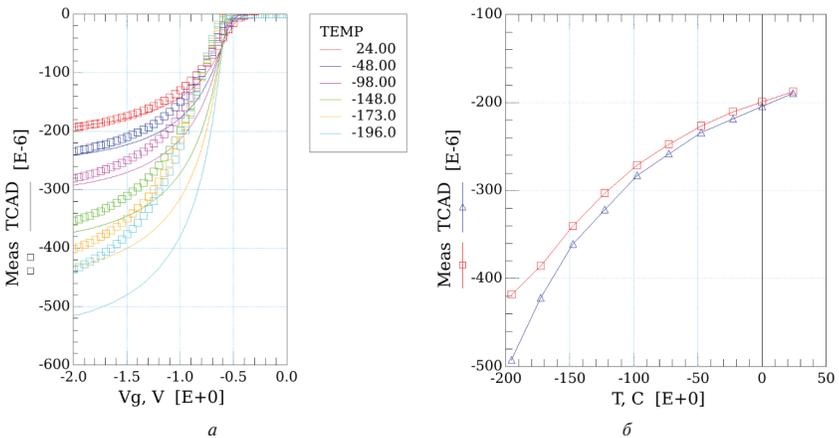


Рис. 2. а) Проходные характеристики p канального МОП-транзистора: символы — TCAD-моделирование, линии — измерения; б) зависимость параметра IDL от температуры, где $IDL = Id @ Vd = -0,1 \text{ В}, Vg = -1,8 \text{ В}$: синяя линия — TCAD-моделирование, красная линия — измерения

Заключение

В ходе реализации проекта был разработан измерительный стенд и проведены измерения в диапазоне температур 65–298 К.

Проведенные измерения экспериментально показали возникновения эффекта вымораживания примеси в слабегированных областях МОП-транзисторов

при криогенной температуре и влияния этого эффекта на вольт-амперные характеристики транзисторов.

Литература

1. Осыкин А. А., Потупчик А. Г., Панышев К. А. Verilog-а модель эффекта вымораживания примеси в LDD областях при криогенных температурах // Моделирование систем и процессов, 2023. — Т. 16. — № 2. — С. 93–100. DOI: 10.12737/2219-0767-2023-16-2-93-100. EDN RYGPPP.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5. EDN JXZUBV.
3. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В. и др. Метод валидации в кремнии библиотек стандартных цифровых элементов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2020. — № 4. — С. 140–145. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-140-145. EDN VPSSQE.
4. Харитонов И. А., Четвериков И. А., Кузин Е. Ю., Исмаил-Заде М. Р. Определение параметров SPICE-моделей МОПТ при низких температурах (до минус 200 °С) // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук, 2017. — Т. 7. — № 2. — С. 41–45. EDN ZSUUDX.

УДК 621.3.049.77

Исследование базовых конструкторско-технологических решений для разработки радиационно стойких библиотек стандартных цифровых элементов в базе технологии КМОП 90 нм на основе RHBD методологии**Ильин С. А., Ласточкин О. В., к. т. н., Копейкин Д. Ю., Новиков А. А., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.***АО «НИИМЭ»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1**lastochkin@niime.ru*

В статье проводится анализ и исследование характеристик комплекта библиотек стандартных цифровых элементов, в том числе с высокой плотностью компоновки, включая стойкость к воздействию специальных видов воздействующих факторов (СВВФ).

Ключевые слова: конструкторско-технологическая платформа проектирования (КТПП); библиотеки стандартных цифровых элементов; комплект средств проектирования; КМОП.

В АО НИИМЭ разработана КТПП радиационно стойких цифровых СБИС и СнК для отечественной КМОП-технологии с минимальными проектными нормами 90 нм с применением методологии RHBD (Radiation Hardened by Design) [1, 2]. В целях исследования возможностей по снижению занимаемой площади и управления уровнем стойкости разрабатываемого изделия к СВВФ был разработан комплект библиотек стандартных цифровых элементов повышенной и высокой плотности с разными вариантами формирования охранных структур. Каждая из библиотек отличается подходом к реализации охранных колец, как показано на рис. 1.

Основным отличием разработанных библиотек от исходной (рис. 1а) является подход к формированию охранных структур. В исходной библиотеке охранными кольцами окружены P- и N-канальные транзисторы. В разработанных — удалены вертикальные элементы охранных структур, что позволяет при размещении ячеек на этапе физического синтеза формировать для группы из нескольких ячеек общие охранные кольца и, тем самым, уменьшить занимаемую площадь, а также по-разному реализованы контакты колец к шинам земли и питания. Для библиотеки с высокой плотностью охранный структура формируется только вокруг транзистора N-типа. Замыкание кольца осуществляется специализированными ячейками (рис. 1д).

В целях проведения исследования, заложенных в топологию элементов библиотек решений, был разработан специализированный тестовый кристалл (ТК), включающий в свой состав комплект кольцевых генераторов и специализированных тестовых структур для валидации библиотек в кремнии [3]. ТК изготовлен на отечественном полупроводниковом производстве по технологии КМОП 90 нм. Проведены измерения ТК в диапазоне напряжений ядра (1,20 В ± 10 %) и температур (−60, +25, +125 °С) и испытания на стойкость к СВВФ.

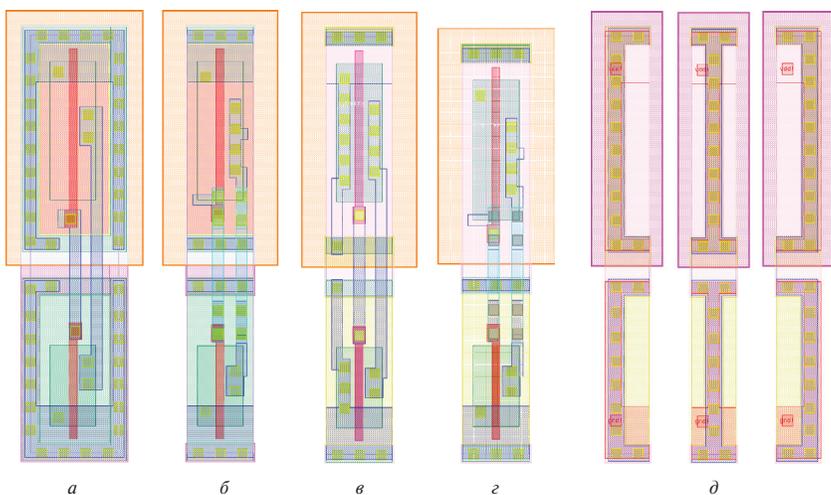


Рис. 1. Топологические реализации ячейки с логической функцией «HE» и нагрузочной способностью «х2» в библиотеках: а) mкmos090rhbdstd; б) mкmos090rhbdstdhdm1; в) mкmos090rhbdstdhdmс; г) mкmos090rhbdstdhdm; д) общий вид топологии элементов замыкания охранного кольца на примере библиотеки mкmos090rhbdstdhdm1 (слева направо: FILL_LFT, FILL_MID, FILL_RGT)

В рамках исследования проведен синтез блоков из наборов ISCAS'85/89 в базах разработанных библиотек. Полученные характеристики блоков (быстродействие, площадь и потребляемая мощность) сравнивались с характеристиками, полученными при синтезе блоков в базе исходной библиотеки и библиотек без применения методологии RHVD. В среднем площадь блоков, синтезированных в базе разработанных библиотек оказалась на 11–19% больше, при сохранении быстродействия, но с обеспечением стойкости к СВВФ.

Разработанные библиотеки полностью совместимы со всеми компонентами КТПП СБИС, включая компиляторы памяти одно- и двухпортового ОЗУ и ПЗУ [4], расширяют возможности применения платформы и обеспечивают:

- разработку СБИС с высокой степенью интеграции;
- расширение возможностей применения КТПП для проектирования сложных систем аэрокосмического и специального назначения;
- устойчивость разработанных СБИС к воздействию СВВФ за счет специальных конструктивно-топологических решений в сравнении с базовой технологией КМОП 90 нм.

Таким образом, в результате проведенного исследования расширены возможности КТПП радиационно стойких СБИС с повышенной стойкостью к СВВФ в базе отечественной технологии КМОП 90 нм.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41. EDN ZUQSZZ.
2. Ильин С. А., Ласточкин О. В., Надин А. С. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования радиационно стойких СБИС на базе отечественной технологии КМОП 90 нм на основе RHBD-методологии // Наноиндустрия, 2019. — № S(89). — С. 254–257. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.254.257. EDN UPRERI.
3. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В. и др. Метод валидации в кремнии библиотек стандартных цифровых элементов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2020. — № 4. — С. 140–145. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-140-145. EDN VPSSQE.
4. Ильин С. А., Ласточкин О. В., Новиков А. А., Шипицин Д. С. Семейство компиляторов радиационно стойких блоков памяти по технологиям КМОП/КНИ с технологическими нормами 180/90 нм // Электронная компонентная база и микроэлектронные модули: сборник докладов 7-й научной конференции Форума Микроэлектроника-2021 (г. Алушта, Республика Крым, 03–09 октября 2021) // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8-1 (113). — С. 247–251. DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.247.251. EDN BIOVHQ.

УДК 004.057.7, 004.94

Проектирование аппаратного ускорителя моделирования RTL

Лукьянченко Г. А., Монахов А. М., Уманский М. В., Елизаров С. Г.

ООО «Мальт Систем»

119333, г. Москва, ул. Фотиевой, 5, стр. 1

info@maltsystem.ru

В докладе рассматриваются основные подходы к решению проблемы верификации цифровых микросхем с большим числом логических элементов, их преимуществ и недостатки. Представлены результаты разработки прототипа аппаратного ускорителя моделирования RTL на базе открытых инструментов, приведены технические характеристики такого ускорителя и продемонстрированы реальные тесты, проведенные на таком прототипе.

Ключевые слова: моделирование; отладка; верификация; RTL; открытые инструменты; Open Source.

Современные микропроцессоры, системы на кристалле (СнК) и другие сложные цифровые сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) содержат сотни миллионов логических элементов (вентилей). В процессе разработки таких интегральных схем неизбежно встает задача моделирования и отладки их схемотехники (RTL-кода). Особенно остро эта проблема стоит для интегральных схем, внутри которых процессор совмещен с высокоскоростными интерфейсами и периферийными устройствами [1]. В процессе разработки таких интегральных схем помимо верификации непосредственно RTL, необходимо проводить верификацию работы операционной системы (ОС), драйверов и других сложных программных компонентов (ПО).

Существуют три общеизвестных подхода к решению проблемы верификации RTL. Все они используются параллельно на разных стадиях проектирования СнК:

- моделирование в классических RTL-симуляторах [2, 3]. Такой подход обеспечивает удобство разработки тестов, вся отладочная информация доступна в любой момент. Однако наблюдаются и недостатки такого метода, например, невозможно загрузить ОС и проверить работу приложений из-за слишком большого времени исполнения;
- макетирование на ПЛИС. Такой подход позволяет работать на частотах порядка 100 МГц, запускать любой софт с настоящей периферией, однако собирать такие проекты крайне трудоемко, требуется адаптировать RTL для ПЛИС, при этом доступ к отладочной информации очень ограничен;
- аппаратные ускорители моделирования RTL. Подход сочетает в себе преимущества первых двух, он позволяет обеспечить доступ к отладочной информации почти в такой же мере, как у RTL-симуляторов, при этом достигается скорость работы порядка 1–10 МГц, что позволяет запускать софт. Время сборки проекта соизмеримо с его компиляцией в симуляторе. Такой подход позволяет использовать несинтезируемые конструкции. Главный недостаток — это огромная стоимость и недоступность основных поставщиков из-за санкций.

Долгое время основной преградой на пути создания такого рода решений была неподъемная сложность разработки ПО для синтеза схемы на ПЛИС собственной разработки, на которых и базируются все подобные решения. Также существенной

задачей является написание собственного симулятора для исполнения несинтезируемого кода. В настоящее время порог вхождения в подобную разработку снижен за счет наличия открытых инструментов синтеза и верификации (Yosys, nextpnr, Verilator и других). На базе таких инструментов можно разработать ПО для быстрой имплементации модели RTL на массиве коммерчески доступных ПЛИС или ПЛИС собственной разработки и построить аппаратный ускоритель моделирования RTL значительно дешевле западных аналогов (в пересчете на стоимость одного моделируемого вентиля).

В докладе будут представлены результаты разработки прототипа аппаратного ускорителя моделирования RTL на базе открытых инструментов, приведены технические характеристики такого ускорителя и продемонстрированы реальные тесты, проведенные на таком прототипе.

Литература

1. Tao Li et al. Chiptlet Heterogeneous Integration Technology—Status and Challenges // *Electronics*, 2020, 9(4):670.
2. Юрлин С. В. Разработка специализированных прототипов на основе программируемой логики для эффективной функциональной верификации многоядерных микропроцессоров: диссертация на соискание ученой степени к. т. н. — Москва: Институт Электронных Управляющих Машин, 2014. — 135 с.
3. Слинкин Д. И. Анализ современных методов тестирования и верификации проектов сверхбольших интегральных схем // *Программные продукты и системы*, 2017. — Т. 30. — № 3. — С. 401–408.

УДК 004.4 + 621.382

Ускорение процесса характеризации библиотек с использованием встроенного программного интерфейса SPICE-симулятора

Сорокин Т. М.¹, Макаров Г. Н.¹, Калашников В. С.¹, Семёнов М. Ю.¹,
Макаров С. В.², Дубровин С. А.²

¹ ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а
info@nm-tech.org

² ООО «Интегральные Решения»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 1
info@is-eda.ru

В работе представлена концепция ускорения процесса характеризации библиотек стандартных цифровых элементов и ячеек ввода-вывода с использованием встроенного программного интерфейса (API) SPICE-симулятора.

Ключевые слова: характеризация; цифровые библиотеки; SPICE-моделирование; САПР; Liberty.

Развитие цифровых библиотек в настоящее время

В настоящее время размер библиотек стандартных цифровых элементов увеличивается в геометрической прогрессии при переходе к более продвинутым технологическим нормам. Как результат, процесс характеризации библиотек занимает все более длительное время и требует все больших вычислительных ресурсов, что приводит к увеличению длительности цикла разработки сложнфункциональных блоков (СФ-блоков) и повышению расходов дизайн-центров на вычислительную инфраструктуру [1–3].

Особенности процесса характеризации

Процессу характеризации цифровых библиотек свойственен запуск очень большого количества коротких симуляций — типичное их количество от сотен тысяч до миллионов при средней длительности одного SPICE-моделирования в несколько секунд (без учета бинарного поиска). При этом этап подготовки может занимать гораздо больше времени, чем собственно моделирование за счет затрат на системный вызов симулятора, на чтение входного файла (SPICE-deck) и SPICE-моделей, на сборку VerilogA-моделей и т. д. Также ресурсозатратным может оказаться обмен результатами моделирования между SPICE-симулятором и инструментом характеризации.

Концепция

Авторами рассмотрена возможность ускорения процесса характеризации библиотек путем реализации более тесной связи между инструментом характеризации и SPICE-симулятором. Для этого предложено к реализации взаимодействие посредством API симулятора, что позволит существенно сократить накладные расходы при вызове симулятора и обработке результатов моделирования.

Исключение многократного вызова SPICE-симулятора

С помощью API инструмент характеристики производит однократную инициализацию SPICE-симулятора в начале характеристики, после чего постоянно находящийся в памяти симулятор поочередно принимает и исполняет все подготовленные для него задачи. Как результат, временные затраты на системный вызов симулятора сводятся практически к нулю. Сокращение затрачиваемого времени для одной симуляции может достигать нескольких секунд в зависимости от вычислительных мощностей, что оказывается существенным при характеристике библиотек ячеек, для которых выполняются миллионы симуляций.

Минимизация нагрузки на систему хранения данных (СХД)

Также авторами предлагается использовать прямую передачу результатов моделирования и измеренных характеристик от симулятора к инструменту характеристики посредством API вместо обмена данными через файловую систему. Это позволит как сократить общее время выполнения характеристики, так и уменьшить нагрузку на СХД.

Заключение

Предварительная оценка предложенного подхода для уменьшения времени характеристики библиотек с использованием отечественного SPICE симулятора SymSpice [4] показывает ускорение примерно в два раза в зависимости от типа ячеек по сравнению со стандартным подходом запуска SPICE симуляций. Дальнейшая проработка и развитие указанных подходов применительно к глубоко-субмикронным технологиям уровня менее 90 нм при расчете продвинутых моделей (CCS Noise, AOCV, LVF) позволит значительно ускорить процесс характеристики библиотек используя только отечественные продукты.

Литература

1. Калашников В. С., Семенов М. Ю. Оптимизация состава библиотек стандартных ячеек // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС), 2016. — Вып. 2. — С. 217–224.
2. Певцов Е. Ф., Шнякин А. А. Анализ и исследования базы библиотечных элементов, и средств САПР, применяемых при полуказанном проектировании интегральных схем // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, 2017. — Т. 17. — № 3. — С. 836–839. EDN YW0AAG.
3. Журавлев Д. В. Характеризация цифровых библиотек: Учебное пособие / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». — Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2015. — 142 с. EDN VUXLCH.
4. SymSpice User Guide, Product version 5.xx, 2023.

УДК 621.3.049

Проблема недетектируемых обрывов в схемах памяти и способы ее решения на этапе проектирования

Новосельцева И. В., Туленко Е. А., Савин С. А., Цырлов Ю. М.

ОП ООО «НМ-Тех» в г. Воронеже
394018, г. Воронеж, ул. Свободы, 69

Недетектируемые обрывы невозможно обнаружить при финальном функциональном тестировании микросхемы, но они вызывают отказ в устройстве пользователя. В докладе описаны механизмы возникновения недетектируемости и предложены способы минимизации вероятности таких отказов при проектировании схем памяти.

Ключевые слова: ОЗУ; ПЗУ; тестирование; дефект; обрыв; детектируемость.

Современные стандарты автомобильной, медицинской и аэрокосмической отраслей требуют нулевого количества дефектных деталей на миллион (DPPM). Проблемой в достижении этой цели являются не выявляемые при тестировании обрывы электрических соединений, возникающие даже при низкой дефектности технологического процесса.

Блок памяти состоит из большого количества повторяющихся структур, как в массиве памяти, так и в ее периферии. Поэтому вероятность отказа в случае проблемы в какой-либо структуре многократно возрастает. Периферийные подблоки подключаются к сигнальным линиям (например к преддекодированным адресам строк и столбцов) с помощью контактов. Отсутствующие или высоко-резистивные контакты по статистике являются самыми распространенными дефектами в микросхемах.

В результате отсутствующего контакта или обрыва металлической линии могут быть не подключены затворы транзисторов (обычно два, $nmos$ и $pmos$ с общим поликремнием) или стоки/истоки транзисторов. В докладе показано, что все эти дефекты могут быть недетектируемыми при определенных вариантах схемы. Проблема не связана с недостаточным покрытием тестовой последовательности; функционального теста, выявляющего такие дефекты, не существует. Неподключенные узлы, которые невозможно выявить при финальном функциональном тестировании названы критическими. Как правило, критические узлы не ведут к отказу только при функциональном тестировании памяти, которое длится короткое время. При более длительной работе в устройстве напряжения в критических узлах изменяются вследствие утечек, и блок памяти отказывает.

Причины недетектируемости могут быть следующими:

- в процессе тестирования напряжение в неподключенном узле соответствует ожидаемому;
- вследствие избыточности схемы переключение неподключенного узла не обязательно для правильного функционирования;
- схемы хранения (защелки) некоторое время сохраняют данные при неподключенной схеме обратной связи вследствие паразитных емкостей или утечек.

Предложены следующие способы решения проблемы недетектируемых обрывов:

- уменьшение количества потенциально не выявляемых при тестировании обрывов (критических узлов) на этапе проектирования электрической схемы:
 - ограничение использования узлов с постоянными уровнями напряжения,
 - ограничение использования избыточности в схеме,
 - внедрение схемных решений, позволяющих сделать недетектируемые обрывы детектируемыми;
- внесение неисправностей в электрическую схему памяти с помощью САПР (fault injection), моделирование схемы и идентификация оставшихся критических узлов;
- уменьшение вероятности обрывов в выявленных критических узлах на этапе проектирования топологии путем создания резервных соединений (дублирование контактов, резервные линии поликремния или металла);
- рекомендации пользователям позволяющие уменьшить вероятность возникновения проблемы недетектируемости:
 - тестирование неиспользуемых входов памяти;
 - использование параметрического тестирования IDDQ (тока в состоянии покоя) при различных состояниях блока памяти и скрининг выбросов с помощью дельта-анализа IDDQ;
 - использование определенного паттерна при программировании неиспользуемых строк массива памяти ПЗУ.

Литература

1. Soden J. M. and Hawkins C. F. Electrical Properties and Detection Methods for CMOS IC Defects // 1st European Test Conference, IEEE 1989.
2. Rei-Fu Huang, Jen-Chieh Yeh, Chih-Wea Wang, Chih-Tsun Huang, and Cheng-Wen A Simulation-Based Methodology for SRAM Defect Analysis and Diagnosis // Wu Laboratory for Reliable Computing (LaRC) Department of Electrical Engineering National Tsing Hua University Hsinchu, Taiwan.
3. Singh A. D., Rasheed H., Weber W. W. IDDQ Testing of CMOS Opens: An Experimental Study // International Test Conference, IEEE 1995.

УДК 621.382

Расширенная SPICE-модель МОП-транзистора для моделирования при криогенных температурах

Осыкин А. А., Нуштаев А. В., Потупчик А. Г.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
aosykin@niime.ru, apotupchik@niime.ru

В работе показаны изменения, которые необходимо внести в стандартную BSIM3v3 модель МОП транзистора для учета изменений в его вольт-амперных характеристиках, вызванных влиянием криогенных температур.

Ключевые слова: SPICE; BSIM3v3; КМОП; криогенные температуры; вымораживание примеси.

Введение

Компактные модели BSIM для МОП-транзисторов широко используются в полупроводниковой промышленности. BSIM модели и, в частности модель BSIM3v3, не моделируют эффект вымораживания примеси, который возникает при температурах близких к криогенным [1]. Для того, чтобы сделать такое моделирование возможным, необходимо расширить исходные уравнения расчета параметров BSIM3v3 модели.

Температурная зависимость подвижности

Наиболее заметное влияние эффект вымораживания примеси оказывает на величину последовательного сопротивления стока и истока R_{ds} . Величина R_{ds} в свою очередь тесно связана с подвижностью электронов в МОП-транзисторе μ_n . При некотором упрощении, зависимость R_{ds} от μ_n имеет обратно пропорциональный характер:

$$I_{ds} = \frac{V_{ds}}{R_{ds}}, \text{ при } R_{ds} \gg R_{ch},$$

$$\text{откуда } R_{ds} \sim \frac{1}{I_{ds}} \sim \frac{1}{\mu_n},$$

где R_{ch} — сопротивление канала транзистора; V_{ds} — напряжение сток-исток. На рис. 1б показана подвижность μ_n , которая была получена из передаточной характеристики n-МОП-транзистора (рис. 1а) в точке максимума крутизны G_m по формуле:

$$\mu_n = \max \left(\frac{dI_d}{dV_g} \Big|_{V_d=0,1B} \right) \cdot \frac{W \epsilon_{ox} V_d}{L \cdot T_{ox}},$$

где W, L — ширина и длина затвора транзистора, ϵ_{ox} — диэлектрическая проницаемость подзатворного окисла, T_{ox} — его толщина. Полученные данные измерений показывают, что характер измерения подвижности от температуры прибора отличается от заявленной в BSIM3v3 модели зависимости μ_n от T , которая выражается формулой:

$$\mu_n(T) = \mu_0(T_{nom}) \cdot (T_{nom} / T)^{U_{\mu}}$$

где T_{nom} — температура экстракции SPICE параметров, а U_{te} — подстроечный коэффициент модели. Новая зависимость $\mu_n(T)$ расширяет исходную путем умножения на полиномиальную функцию:

$$\mu_n(T) = [\mu_0(T_{nom}) \cdot (T_{nom}/T)^{U_{te}}] \cdot (1 + U_{te1}(T - T_{nom}) + U_{te2}(T - T_{nom})^2),$$

где U_{te1} , U_{te2} , — коэффициенты при полиноме.

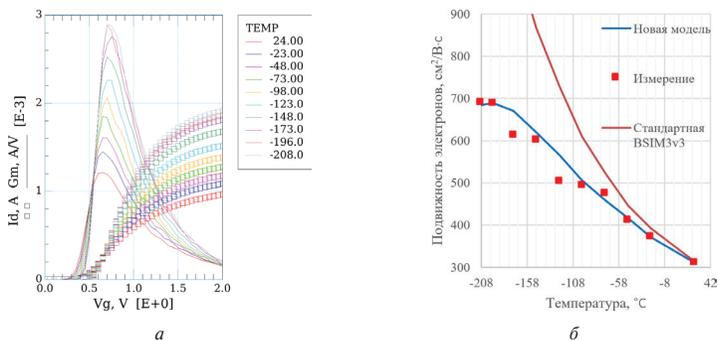


Рис. 1. а) Зависимость тока стока I_d и крутизны G_m от напряжения на затворе V_g ; б) температурная зависимость подвижности электронов μ_n для n-МОП-транзистора $W/L = 10 \mu m / 0,18 \mu m$

Заключение

Расширенная SPICE-модель МОП-транзистора для моделирования при криогенных температурах построена на основе данных измерений приборов в диапазоне длин затвора от 0,18 μm до 10 μm и температур от $-208^{\circ}C$ до $+27^{\circ}C$. Среднее отклонение модели от данных измерений составляет не более 15%.

Литература

1. Осыкин А. А., Потупчик А. Г., Панышев К. А. Verilog-а модель эффекта вымораживания примеси в LDD областях при криогенных температурах // Моделирование систем и процессов, 2023. — Т. 16. — № 2. — С. 93–100. DOI: 10.12737/2219-0767-2023-16-2-93-100. EDN RYGPFF.
2. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41. EDN ZUQSZZ.
3. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В. и др. Метод валидации в кремнии библиотек стандартных цифровых элементов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС), 2020. — № 4. — С. 140–145. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-140-145. EDN VPSSQE.
4. Харитонов И. А., Четвериков И. А., Кузин Е. Ю., Исмаил-Заде М. Р. Определение параметров SPICE-моделей МОПТ при низких температурах (до минус $200^{\circ}C$) // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук, 2017. — Т. 7. — № 2. — С. 41–45. EDN ZSUUDX.

УДК 621.382

Повышение эффективности аналогового проектирования ИС за счет внедрения схмотехнических PCell

Надин А. С., Кириллов М. А., Шипицын Д. С., к. ф.-м. н.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

anadin@niime.ru, mikirillov@niime.ru, dshipitsin@niime.ru

Предложено решение по повышению эффективности аналогового проектирования ИС за счет внедрения в PDK схмотехнических PCell для современных полупроводниковых технологий уровня 90 нм и ниже [1]. Что позволяет автоматически декомпозировать и преобразовывать физические параметры приборов в электрической схеме повышая точность pre-layout симуляции за счет минимизации влияния аппроксимации при их расчете.

Ключевые слова: PDK; PCell LDE параметры; schematic; схмотехнические параметрические ячейки; pre-layout симуляция; нетлист.

Борьба за повышение эффективности проектирования ИС имеет постоянный характер и высокий приоритет для разработчиков средств проектирования, так как непосредственно влияет на качество и время проектирования аналоговых ИС за счет минимизации количества итерационных циклов проектирования. Это особенно актуально для современных полупроводниковых технологий уровня 90 нм и ниже, где цена ошибки крайне высока, а ранний выход конечного изделия на рынок имеет важное значение. Один из возможных вариантов сокращения итерационного цикла проектирования аналоговых ИС за счет повышения точности pre-layout симуляции.

Для норм 90 нм и ниже количество параметров, зависящих от физической конфигурации прибора и его размещения в топологии, увеличивается, как и их влияние на точность pre-layout симуляции. Ниже приведен наиболее часто используемый список таких параметров, влияющих на физическую структуру приборов:

- мультиплицирование (multiplier);
- количество затворов (number of fingers);
- количество соединений параллельно (number of parallel);
- количества соединений последовательно (number of serious) и т. п.

При значении параметров, отличных от единицы, в электрической схеме предполагает аппроксимацию расчета зависимых параметров, таких как AS, AD, PS PD, LDE параметров и др., снижая эффективность pre-layout симуляции.

Как решение авторы рассматривают расширение библиотеки аналоговых примитивов из состава PDK дополнительными специализированными элементами с постфиксом «_mc», дублирующие основные приборы, что ранее в PDK не применялось [2]. Они имеют стандартный набор для аналоговых примитивов представления «symbol» и «layout», но дополнены представлением «schematic», который является динамически генерируемым в соответствии с вводимыми параметрами элемента, т. е. схмотехническими PCell.

Такой PCell представляет собой управляющий программный код, с помощью которого генерируется электрическая схема с автоматическим размещением примитивов, цепей межсоединений и терминалов в зависимости от задаваемых

входных параметров, влияющих на физическую структуры прибора. При этом символ «symbol» такого элемента становится иерархическим, т. е. содержит дополнительный уровень иерархии.

PCell позволяет автоматически декомпозировать в единичные приборы внутри иерархии и преобразовать их параметры, влияющие на физическую структуру прибора, тем самым минимизируя аппроксимацию расчета зависимых параметров приближая значения к реальной топологии и post-layout симуляции. К условному минусу решения можно отнести увеличение выходного нетлиста из-за генерации декомпозированных приборов, при этом его объем будет соответствовать экстрагированному из топологии. В свою очередь это позволит разработчику выполнить обратную аннотацию (back-annotation) параметров напрямую без аппроксимации параметров [3].

В результате группой разработчиков предложена и реализована интеграция методологии схмотехнических PCell в PDK для перспективных технологий, способная повысить эффективность аналогового проектирования ИС за счет преобразования и декомпозиции приборов и их параметров для достижения соответствия на уровне электрической схемы физическому уровню в топологии, при этом полностью сохранив и дополнив привычный аналоговым разработчикам ИС функционал.

Литература

1. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7-8. — С. 124–128. EDN JSFYRB.
2. Ильин С. А., Кочанов С. К. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования СБИС на базе отечественной технологии КНИ 90 нм // Электронная компонентная база и микроэлектронные модули: сборник докладов 3-й международной научной конференции в рамках Форума Микроэлектроника-2017 (г. Алушта, Республика Крым, 2–7 октября 2020) // Наноиндустрия, 2018. — № S (82). — С. 365–368. DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.365.368. EDN XQVMYH.
3. Надин А. С., Тюрин А. В., Шипицин Д. С. Метод повышения точности схмотехнического моделирования на основе учета LDE-параметров для технологии 28 нм // Электронная компонентная база и микроэлектронные модули: сборник докладов 6-й международной научной конференции в рамках Форума Микроэлектроника-2020 (г. Ялта, Республика Крым, 28 сентября — 3 октября 2020) // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-2 (102). — С. 403–405. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.403.405. EDN XUAEWD.

УДК 621.3

Разработка электронной компонентной базы на основе математической модели магниторезистивного преобразователя для применения в гражданских системах управления и контроля в робототехнике, авто электронике и авиации

Полевиков В. В., к. т. н., Юров А. С., к. т. н., Чеплаков А. А., магистр., Литвиненко Э. О., магистр

*АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*

Разработана и внедрена в типовой маршрут проектирования СБИС датчиков математическая модель магниторезистивного преобразователя индукции магнитного поля в напряжение на основе магниторезистивных пленок. Приведены характеристики модели и дана оценка ее адекватности. Показаны примеры применения модели при проектировании СБИС датчиков индукции магнитного поля для систем управления в робототехнике, автоэлектронике и авиации.

Ключевые слова: САПР; АМР преобразователь; СБИС; датчик магнитного поля; датчик тока; магнитометр.

СБИС датчиков индукции магнитного поля применяются для построения широкой номенклатуры электронных модулей и приборов для применения в области измерения и контроля постоянного и/или переменного тока, положения физических объектов в пространстве и измерения и регистрации магнитных полей в плоть до магнитных полей земли. Таким образом, появляется возможность непосредственного контроля и управления за:

- постоянными и/или переменными токами в электрических цепях в автомобилях, промышленном оборудовании, ЖКХ и пр.;
- физическое положение узлов и механизмов в автомобильной промышленности, авиации в робототехнике;
- построение автономных систем навигации (электронные компас) для управления воздушными, наземными и надводными средствами передвижения, в первую очередь беспилотных.

Однако, задача построения сквозного маршрута проектирования СБИС датчиков магнитного поля на основе АМР преобразователей не решена. Поэтому целью создания модели датчика тока заключается в отражении происходящих в нем физических процессов, а также получении выходных величин для дальнейшей обработки в специализированной СБИС датчика. Разработанная имитационная модель позволяет анализировать электрические характеристики АМР-преобразователя, учитывая все особенности конструкции, тем самым повышая эффективность используемого маршрута проектирования в средствах типовых САПР, например Cadence.

Предлагаемая математическая модель преобразователя и маршрут проектирования прошел апробацию в ДЦ СБИС АО «ЗНТЦ» при разработке и освоении серийного производства семейства СБИС датчиков тока, в диапазоне измеряемых токов от единиц до сотен ампер, семейства СБИС датчиков линейного и углового

положения физических объектов, а также 3-осевого модуля датчика магнитного поля, электронного компаса.

Литература

1. Ritzinger P, Výborný K. Anisotropic magnetoresistance: materials, models and applications // Royal Society Open Science, 2023. № 10.
2. Trushin M., Výborný K. Anisotropic magnetoresistance of spin-orbit coupled carriers scattered from polarized magnetic impurities // Physical review. B, Condensed matter, 2009. Vol. 80. № 13.
3. Nie H. B., Xu S. Y., Ong C. K. Magnetic anisotropy and magnetoresistance of sputtered [(FeTaN)/(TaN)](n) multilayers // Journal of Applied Physics, 2003. Vol. 91. № 10.
4. Kostevšek N., Serša I. Characterization of metal-based nanoparticles as contrast agents for magnetic resonance imaging // Comprehensive Analytical Chemistry, 2021. Vol. 93. P. 303–343.
5. Tumański S. Thin film magnetoresistive sensors. First Edition. — Bristol; Philadelphia: CRC Press, 2001. 576 p.
6. Markevicius V., Cepenas M., Navikas D., Valinevicius A., Andriukaitis D. Research of Magnetic Field Influence on the Offset and Sensitivity of Magnetoresistive Sensor Readings // Elektronika ir Elektrotechnika, 2013. Vol. 19. № 2. P. 37–40.
7. Mohamadabadi K., Jeandet A., Hillion M., Coillot C. Autocalibration Method for Anisotropic Magnetoresistive Sensors Using Offset Coils // IEEE Sensors Journal, 2013. Vol. 13. № 2. P. 772–776.
8. Fúra V., Petrucha V., Platil A. Construction of an AMR magnetometer for car detection experiments // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. Vol. 108.
9. Чеплаков А., Литвиненко Э. Разработка математической модели AMR — преобразователя для внедрения в САПР // Электроника, Наука, Технология, Бизнес, 2024. — № 3.

УДК 004.41

ПК «Сервис» — реализация модуля внешнего заказчика с учетом требований информационной безопасности

Медведев К. А., Панкратов А. Л., Иванов В. В., к. ф.-м. н., Капкин И. Д.,
Костюк М. Д., Рябинин А. Д.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

kmedvedev@niime.ru, apankratov@niime.ru, vlaivanov@niime.ru, ikapkin@niime.ru,
mkostyuk@niime.ru, ar-yabinin@niime.ru

В работе рассмотрены особенности реализации внешних компонентов платформы для взаимодействия с заказчиком ПК «Сервис» с учетом требований по обеспечению информационной безопасности. Описаны решения по разграничению информационных потоков, реализации шифрования и синхронизации данных.

Ключевые слова: сервис; информационная безопасность; шифрование данных; AES-128.

Введение

На сегодняшний день одним из важнейших аспектов при разработке сложных информационных систем и программных комплексов является выполнение требований по обеспечению информационной безопасности (ИБ). Эти требования направлены в первую очередь на защиту конфиденциальной информации, обеспечение ее целостности и исключение рисков нанесения ущерба компании. Дополнительные ограничения могут накладываться и на программное обеспечение, применяемое при проектировании изделий микроэлектроники [1].

В процессе разработки платформы для взаимодействия с заказчиком ПК «Сервис» [2] были сформулированы следующие требования ИБ:

- внешние компоненты системы должны быть изолированы от внутренней корпоративной сети;
- обмен информацией между внешними и внутренними компонентами системы должен инициироваться внутренним сервером;
- информация на внешнем сервере не должна храниться в открытом виде;
- в системе не должны храниться персональные данные пользователей;
- доступ пользователей к внешнему серверу должен осуществляться с использованием сертифицированных средств криптографической защиты информации;
- должен быть реализован двухфакторный метод идентификации пользователей;
- внешний сервер системы должен быть защищен должен быть защищен сертифицированным межсетевым экраном уровня веб-сервера (тип «Г») с СОВ;
- антивирусная защита, резервное копирование и парольная политика должны быть реализованы в соответствии с регламентом компании.

Реализация

Перечисленные требования по обеспечению информационной безопасности были учтены при проектировании архитектуры программного комплекса (рис. 1). Система имеет двухконтурную структуру, синхронизация информации между контурами осуществляется с помощью специального сервиса.

Подключение пользователей к внешнему контуру осуществляется по VPN-соединению, устанавливаемому при помощи USB-ключа (решение «Рутокен — КристоТуннель»). Пользовательские базы данных и файловые системы изолированы друг от друга и очищаются после завершения сессии.

Вся информация на внешнем сервере зашифрована с применением симметричного алгоритма шифрования (AES-128 в режиме ECB с паддингом PKCS7) с аппаратным ускорением, использующим расширение системы команд AES-NI. Ключи шифрования уникальны для каждой пользовательской сессии и передаются по защищенному каналу. Синхронизация данных инициируется внутренним сервером и поддерживает параллельную загрузку данных и файлов.

При разработке внешних модулей системы использовалась микросервисная архитектура. Такой подход обеспечивает высокую отказоустойчивость системы, а также гибкость и простоту дальнейшего масштабирования.

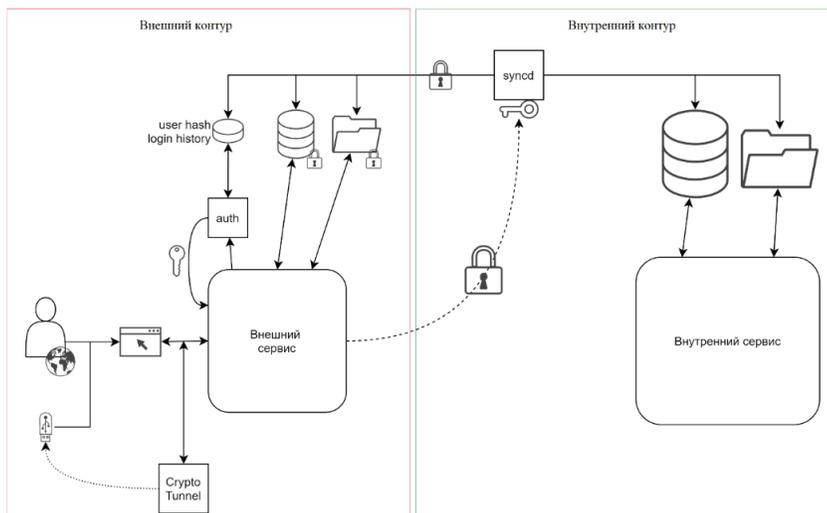


Рис. 1. Архитектурная схема портала

Заключение

Предложенная двухконтурная реализация ПК «Сервис» обеспечивает изоляцию внутренних и внешних компонентов системы, разграничивает потоки информации и обеспечивает выполнение всех требований ИБ, выдвигаемых при разработке современных информационных систем. При этом обеспечивается высокая скорость обмена информацией, загрузки файлов и данных, что положительно сказывается

на пользовательском опыте использования системы. Применение микросервисной архитектуры позволяет создать задел для дальнейшего масштабирования системы и упрощает интеграцию новых сервисов на платформе.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93. EDN YOL-YNB.
2. Медведев К. А., Иванов В. В., Жаворонкин Ю. Г., Рябинин А. Д. Платформа для взаимодействия с заказчиком и автоматизации внутренних процессов предприятия // Российский форум микроэлектроника 2023: Сборник тезисов 9-й Научной конференции, Москва, 09–14 октября 2023 года. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. — С. 819–821. EDN IGMZNM.

УДК 621.396.6

Применение LTCC-технологии для создания пассивных компонентов и плат СВЧ модулей

Галдецкий А. В., к. ф.-м. н., Щербаков С. В., к. т. н.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

galdetskiy@mail.ru, sam-22@mail.ru

В статье описаны основные достоинства и недостатки, этапы изготовления и особенности применения LTCC-технологии для создания пассивных компонентов и плат для СВЧ модулей различного назначения, а также описаны некоторые особенности размещения активных элементов (кристаллов СВЧ-транзисторов и МИС СВЧ) на LTCC-платах и обеспечения их теплового режима работы.

Ключевые слова: низкотемпературная совместно обжигаемая керамика (керамика низкотемпературного обжига; LTCC); пассивный электронный компонент; плата; СВЧ модуль; проектирование; разработка.

Применение многослойных плат (из материалов типа Rogers или керамики низкотемпературного обжига LTCC) стало одним из существенных факторов повышения эффективности, надежности и технологичности изготовления СВЧ-модулей, снижения их массо-габаритных показателей и в целом радиоэлектронной аппаратуры, создаваемой на их основе [1]. Важным является то, что в межслойном пространстве LTCC-плат возможно размещение не только соединительных проводников, но и пассивных компонентов электрических схем, таких как фильтры, емкости, резисторы и др.

В начальной части статьи рассмотрено современное состояние рынка, и приведены возможности по реализации пассивных компонентов на основе LTCC-технологии.

Анализ мирового рынка [2] показывает, что ряд зарубежных компаний, включая крупные — Minicircuits, Johanson и др. выпускают широкую номенклатуру пассивных радиочастотных компонентов на базе LTCC для телекоммуникационной аппаратуры (Wi-Fi, GPS, мобильная связь и др.): антенны, схемы развязки электропитания, фильтры, ответвители, сумматоры/делители, согласующие трансформаторы, диплексеры, мосты 90°/180° и др. (рис. 1) на основе LTCC систем фирм «Du Pont» и «Ferro» (США). При этом эти изделия могут быть выполнены как в виде отдельных элементов для поверхностного монтажа, так и в составе многослойных плат управляющих, приемных, передающих или прямо-передающих устройств (модулей) [3].

В основной части статьи отмечается, что в России создана собственная система стеклокерамики (СКМ), полный аналог американской, и к настоящему времени имеется определенный опыт разработок и серийного производства пассивных LTCC компонентов и плат для СВЧ модулей различного функционального назначения [4].

При этом отмечают достоинства создаваемых на основе LTCC-технологий радиочастотных компонентов:

- устройства имеют малые габариты, достаточно высокие технические характеристики и приемлемую стоимость;

- герметичность от влаги, включая выпадение конденсата внутри электронного устройства при достижении точки росы;
- устойчивость к нагреву устройства при пожарах или сильных индукционных токах, что важно для специальных целей;
- неизменяемость геометрии устройства при резких перепадах температуры;
- высокая механическая прочность как для закаленного стекла;
- высокая надежность микроволновых устройств;
- возможность создания многослойных плат (3D-интеграция);
- решена задача проектирования фильтров и других пассивных компонентов под требования заказчика на основе имеющегося и освоенного отечественными специалистами специального программного обеспечения для проектирования пассивных компонентов в LTCC исполнении, а также отработаны методики их синтеза и оптимизации (рис. 2).

Теоретически LTCC не имеет существенных недостатков относительно предшествующей ей технологии HTCC и фактически является ее совершенствованием с использованием более дешевых материалов и более простого низкотемпературного процесса. Однако, практика показала, что высокая эффективность LTCC технологии достигается только если габаритные размеры устройств не превышают 100 мм. Тут вмешивается экономика. Это связано как со свойствами самой системы LTCC, так и с возможностями используемого технологического оборудования. При увеличении габаритов создаваемых устройств значительно снижается выход годных и, соответственно, на порядки возрастает стоимость изделий.

В статье приведен технологический процесс создания устройств на основе LTCC технологий, а также изложен ряд проблем, с которыми столкнулись отечественные производители в начальный период использования LTCC технологий и которые по мере освоения этих технологий удалось минимизировать.

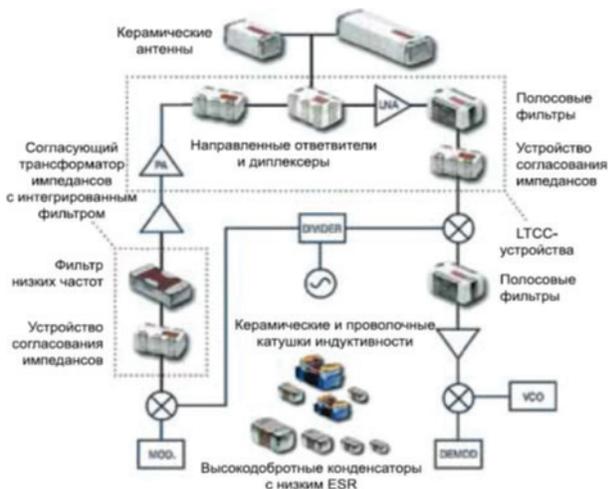


Рис. 1. Номенклатура пассивных компонентов, выполненных на основе LTCC-технологий

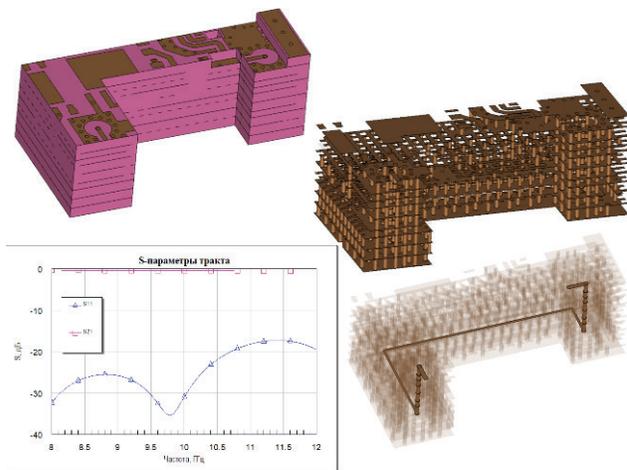


Рис. 2. Пример проектирования тракта СВЧ-схемы

Рассмотрен ряд прикладных задач при использовании LTCC технологий для создания СВЧ модулей различного назначения, в том числе создание корпусов и оснований, а также технологические решения для обеспечения теплоотводов мощных МИС СВЧ в составе радиочастотных модулей.

В заключении приводятся основные выводы, а также приведены перспективные направления дальнейших исследований с области LTCC технологий.

Литература

1. Далингер А. Г., Щербаков С. В. Технологическая эволюция электронных СВЧ модулей // *Материалы Международного Форума «Микроэлектроника-2020», Крым, Ялта, 2020.*
2. Multi-chip Module Market Overview. Отчет об исследовании рынка многокристалльных модулей — прогноз до 2027 г., 2019.
3. Буробин В. А., Щербаков С. В. Технологические аспекты создания и внедрения в серийное производство многокристалльных модулей для радиочастотных приложений // *Материалы Международного Форума «Микроэлектроника-2022».* — Сочи, 2022.
4. Гусев А. П., Павлов А. В., Павлова С. Г., Мякинчиков В. Ю., Сытилин С. Н. Высокочастотный малогабаритный СВЧ модуль в керамике LTCC с применением монтажа «Flip-Chip» // *Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2016.* — Вып. 4 (531).



УДК 621.382.2/.3

Примеры МИС СВЧ, разработанных с использованием различных подходов и инструментов проектирования — полет технической мысли или борьба с ограничениями

Кондратенко А. В., Шишкин Д. А., Сорвачев П. С.

АО «Микроволновые системы»

105122, г. Москва, Щёлковское шоссе, 5, стр. 1

avk@mwsystems.ru

В докладе представлен ряд реализованных проектов GaAs / GaN МИС СВЧ, разработка которых велась с применением различных инструментов проектирования, доступных в текущий момент времени, а также на основе различных подходов, диктуемых степенью характеристики используемого технологического процесса.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема; диапазон СВЧ; взаимодействие по методу Foundry; система автоматизированного проектирования; библиотека моделей базовых элементов.

В настоящее время системы автоматизированного проектирования (САПР) являются неотъемлемым инструментом разработки устройств СВЧ в целом и монолитных интегральных схем (МИС) в частности. При этом процесс разработки МИС СВЧ подразумевает наличие моделей базовых элементов, соответствующих используемому технологическому процессу, и, либо напрямую интегрированных в САПР, либо подключаемых в виде отдельных библиотек моделей. Конечно же, функциональный состав САПР, а также полнота описания технологического процесса различными моделями во многом определяют эффективность процесса разработки, но авторы доклада сразу бы хотели сделать два замечания, влияющих (в том числе, с экономической точки зрения) на создание отечественных средств проектирования, идущее параллельно развитию отечественного базиса технологий микроэлектроники, а также решение тактических задач по созданию МИС СВЧ, востребованных в текущий период времени. Во-первых, недопустима абсолютизация инструментов проектирования, которая выражается в заявлениях отдельных коллективов, что функциональный состав создаваемых ими программных продуктов может являться поводом для снижения квалификации разработчиков МИС. Во-вторых, существует баланс между функциональным составом САПР / совершенством отдельных библиотек моделей и подходами к проектированию с использованием предоставленных программных возможностей. Игнорирование вышесказанного ставит под вопрос рациональность использования кадровых и материальных ресурсов, а также полноту решения технических задач, в особенности сегодня, когда в сложившихся геополитических обстоятельствах отечественная отрасль микроэлектроники стремительно меняет свой облик и структуру.

Уже на протяжении нескольких десятилетий подавляющее большинство зарубежных фабрик при создании библиотек моделей, описывающих предоставляемые ими GaAs / GaN-технологические процессы, ориентируются на САПР AWR Design Environment от компании Applied Wave Research (сегодня входит в состав компании Cadence Design Systems, США) и Advanced Design System от компании PathWave

Design (подразделение Keysight Technologies, США), являющиеся общепризнанными лидерами на мировом рынке программных продуктов, предназначенных для разработки устройств СВЧ. Данные САПР снискали популярность и в отечественной микроэлектронике СВЧ, как у обладателей технологических процессов, требующих модельной характеристики, так и у дизайн-центров и Fables-компаний, занимающихся разработкой МИС СВЧ. Однако сегодня, когда российские компании лишились официального доступа, как к части зарубежного технологического базиса, так и к средствам проектирования, в том числе к САПР AWR Design Environment и Advanced Design System, остро строит вопрос о пересмотре как инструментов проектирования МИС СВЧ, так и доступных подходов.

В докладе представлен ряд реализованных проектов МИС СВЧ, разработка которых велась с применением различных инструментов проектирования, доступных в текущий момент времени, а также на основе различных подходов, диктуемых степенью характеристики используемого технологического процесса. При этом авторы доклада попытались провести параллель между ограничениями, с которыми когда-то сталкивались отдельно взятые компании, и той ситуацией, в которой находится сегодня отечественная микроэлектроника СВЧ в целом.



УДК 621.3.049.776.422

Приемо-передающий модуль X-диапазона на основе Si и GaN СВЧ ЭКБ

Баранов Г. В.^{1,2}, к. ф.-м. н., Болгов С. Ю.^{1,2}, Кривошеев А. В.^{1,2}, Матвеев В. С.², Панасенко П. В.², д. т. н.

¹ ООО «НИИМЭ-МД»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, помещ. V, офис 18з
gbaranov@niime.ru

² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Работа посвящена разработке СВЧ приемо-передающего модуля X-диапазона на основе Si и GaN СВЧ ЭКБ в едином гетероинтегрированном конструктиве с применением кремниевого интерпозера. Представлены результаты разработки электрической схемы и конструкции СВЧ модуля, а также исследований согласования электрических характеристик СВЧ ЭКБ для использований модуля в радиоэлектронной аппаратуре на базе АФАР.

Ключевые слова: СВЧ модуль; X-диапазон; Si КМОП; GaN; Si интерпозер.

Ключевым трендом развития современных радиолокационных и радиосвязных систем на базе АФАР наряду с улучшением тактико-технических характеристик является снижение их стоимости. Стоимость таких систем, главным образом, определяется комплектуемой СВЧ электронной компонентной базой (ЭКБ), в качестве которой традиционно используют GaAs СВЧ интегральные схемы (ИС), обеспечивающие отличный баланс технических характеристик [1]. Однако, данная технология характеризуется относительно высокой стоимостью, что в значительной степени сдерживает увеличение объемов производства существующей и разработку перспективной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Один из известных подходов к решению данной задачи состоит в совместном использовании кремниевой и $A^{3}B^{5}$ ЭКБ в едином гетероинтегрированном конструктиве СВЧ модуля. В данной работе исследуются вопросы использования Si КМОП ЭКБ в диаграммо-образующем узле и GaN ЭКБ в части входных/выходных каскадов приемо-передающего модуля, реализованного на основе кремниевого интерпозера.

В рамках работы представлены результаты разработки СВЧ модуля X-диапазона, определен и заложен оптимальный баланс электрических параметров используемой СВЧ ЭКБ, исследованы особенности совместного применения Si и GaN ЭКБ, касающиеся компенсации недостаточно высоких характеристик Si КМОП ЭКБ в части линейности, мощности и коэффициента шума.

Литература

1. Красников Г. Я. и др. Приемо-передающий submodule X-диапазона частот // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 3. — С. 23–29.

УДК 623.482

Приемо-передающий модуль СВЧ-диапазона частот на отечественной ЭКБ

Карасев М. С., Щеголев С. А., Далингер А. Г., Шацкий С. В., Адиатулин А. В.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
info@istokmw.ru

В работе представлен приемо-передающий модуль СВЧ-диапазона частот, изготовленный с использованием только отечественной ЭКБ. Приведено описание конструкции и электрические параметры, полученные в результате экспериментальной проверки.

Ключевые слова: приемо-передающий модуль; СВЧ-диапазон частот; экспериментальная проверка.

Разработка приемо-передающих модулей (ППМ) является одним из важных направлений в современной электронике. ППМ играют ключевую роль в обеспечении надежной и быстрой связи, что делает их незаменимыми для широкого спектра применений, от телекоммуникаций до оборонной промышленности. Использование компонентов исключительно российского производства в разработке приемо-передающих модулей имеет ряд преимуществ. Во-первых, это способствует укреплению независимости страны в критически важных областях, таких как оборона и связь. Во-вторых, это стимулирует развитие отечественной электронной промышленности, создавая новые рабочие места и способствуя экономическому росту. Наконец, это повышает уровень безопасности и надежности систем, поскольку исключается возможность внешнего вмешательства или саботажа через импортные компоненты. Однако, несмотря на все преимущества, разработка и производство приемо-передающих модулей требуют значительных инвестиций в исследования и разработки, а также наличия высококвалифицированных кадров. Поэтому важно создать благоприятные условия для развития этой отрасли, включая государственную поддержку и стимулирование инноваций.

В результате решения не простой научно-технической задачи по импортозамещению ЭКБ ИП, АО «НПП «Исток» им. Шокина» разработало и изготовило приемо-передающий модуль с использованием только отечественной ЭКБ. Основные электрические параметры ППМ:

- коэффициент шума не более 4 дБ;
- коэффициент усиления от 25 дБ до 32 дБ;
- АТТ в ПРМ 6 бит с шагом 0,5 дБ;
- ФВР в ПРМ и ПРД по 6 бит с шагом 5,625°;
- выходная мощность более 13 Вт.

Разработанный ППМ планируется использовать в перспективных образцах ВВСТ.

Литература

1. Карасев М. С. Многофункциональный приемо-передающий модуль X-диапазона частот // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2019. — Вып. 3 (542). — С. 51–54.
2. Карасев М. С. Приемо-передающий submodule X-диапазона частот // Электронная техника: Серия 1: СВЧ-техника, 2020. — Вып. 3 (546). — С. 40–44.



УДК 621.382

Разработка приемо-передающего модуля миллиметрового диапазона длин волн на основе монолитной интегральной схемы

Макарцев И. В.^{1,2}, Беляков В. А.¹, Дюков Д. И.¹, Власов В. В.³, Воробьев А. К.³

¹ АО «НПП «Салют»

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ларина, 7, корп. 1

makartseviv@nppsalyut.ru

² Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

³ ПАО «НПП «Импульс»

129626, г. Москва, просп. Мира, 102

Приведены результаты разработки и экспериментального исследования составной части малогабаритного приемо-передающего модуля — монолитной интегральной схемы на основе базового технологического процесса GaAs рНЕМТ с длиной затвора транзистора 70 нм.

Ключевые слова: радиолокационный датчик; приемо-передающий модуль; генератор; управляемый напряжением; монолитная интегральная схема; GaAs рНЕМТ.

Наиболее важным узлом радиолокационного датчика (РД), определяющим его основные технические характеристики, является приемо-передающий модуль (ППМ). Важность ППМ заключается в том, что его параметры и характеристики в значительной степени определяют эффективность всего РД в целом (дальность действия, разрешающую способность, массогабаритные характеристики). Поэтому предъявляемые требования к РД, в первую очередь, относятся к ППМ.

В общем виде ППМ включает в себя следующие основные функциональные части [1, 2]: антенную систему и приемо-передатчик. Приемо-передатчик состоит из генератора, управляемого напряжением (ГУН), модулятора, усилителя мощности и проходного балансного смесителя. Модулирующее напряжение $U_{упр}$ подается на ГУН. Генерированный СВЧ-сигнал, усиленный с помощью усилителя мощности, проходит через балансный смеситель и подается на антенну. Этот же сигнал используется в качестве опорного (гетеродинного). Отраженный сигнал поступает на антенну и на вход смесителя. В результате смешивания (перемножения) двух гармонических колебаний (отраженного сигнала и гетеродина) в смесителе приемо-передатчика образуется сигнал биений, мгновенная частота которого равна абсолютному значению разности мгновенных частот излученного и принятого сигналов.

В данной работе приведены результаты разработки и экспериментального исследования ППМ на основе монолитной интегральной схемы (МИС). На одном кристалле размером 2,1×2,1 мм размещены ГУН, модулятор, усилитель мощности и проходной балансный смеситель. Построение СВЧ ППМ на основе МИС позволяет повысить технологичность изготовления, стойкость к внешним воздействующим факторам, уменьшить габаритные размеры, массу ППМ и потребляемую

мощность по сравнению с классическим подходом при построении ППМ на основе волноводно-гибридной технологии.

На рис. 1 приведены результаты измерений зависимости частоты выходного сигнала МИС от напряжения управления.

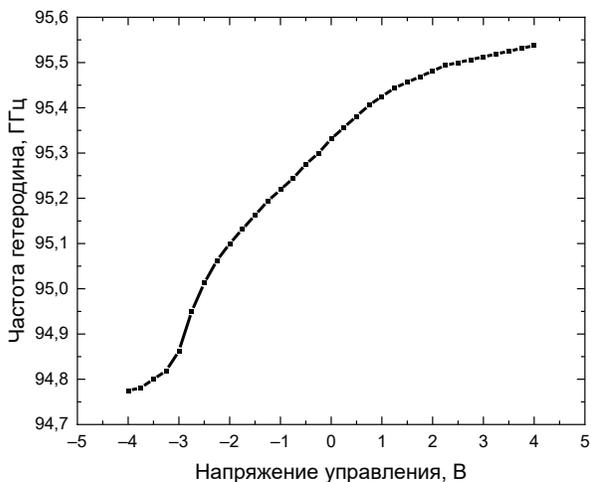


Рис. 1. Зависимость частоты выходного сигнала от напряжения управления

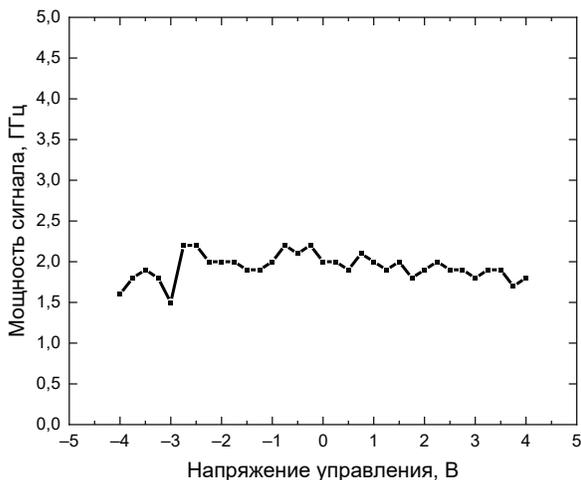


Рис. 2. Зависимость мощности выходного сигнала от напряжения управления



Из рис. 1 видно, что при изменении напряжения от $-1,0$ до $1,0$ В девиация частоты составляет примерно 200 МГц в диапазоне от $95,2$ до $95,4$ ГГц. Нелинейность модуляционной характеристики в заданном диапазоне не превышает 5% .

На рис. 2 показана зависимость мощности выходного сигнала МИС ППМ от напряжения управления. Видно, что выходная мощность составляет около 2 мВт при токе потребления МИС около 30 мА при напряжении питания 5 В. Неравномерность выходной мощности при изменении напряжения управления не превышает $0,5$ мВт.

Таким образом, показана возможность реализации малогабаритного приемопередатчика в монолитном интегральном исполнении по базовому технологическому процессу МИС СВЧ с проектными нормами 70 нм.

Литература

1. Климашев Б. М., Петров И. П. Устройства ближней радиолокации с непрерывными сигналами // Методическое пособие. — Куйбышев, 1974. — 51 с.
2. Комаров И. В., Смольский С. М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. — М.: Горячая линия — Телеком, 2010. — 392 с.

УДК 621.373.1

Отечественный широкополосный генератор сигналов произвольной формы с открытым исходным кодом

Елизаров С. Г., Монахов А. М., Галдин И. В., Иванов Д. М., Дюкова А. С., Боннет Я. В., Чернухин В. В., Кузьмич М. А., Белкин М. А., Гончаров С. В., Спиридонов Р. В.

ООО «Мальт Систем»

119333, г. Москва, ул. Фотиевой, 5, стр. 1

info@maltsystem.ru

Мы представляем отечественный одно- и двухканальный генератор сигналов произвольной формы с полосой частот до 16 ГГц. Производительность канала — 32 ГВыб/с, реальное разрешение по вертикали 5–7 бит. Объем памяти хранения выборки 4–8000 Мбайт. Принципиальное отличие от конкурентов — открытость и возможность перепрограммирования генератора пользователем.

Ключевые слова: AWG; Arbitrary Waveform Generator; генератор сигналов произвольной формы; Direct Digital Synthesis; ЦАП; цифроаналоговый преобразователь.

Разработка и испытания современных приемо-передатчиков (Ethernet, PCIe и т. д.) и соответствующего электронного оборудования, включает тесты на сигналах с полосой частот 0–15 ГГц (например 28G NRZ, 56G PAM4) и выше. Гибкое решение таких задач — это генераторы сигналов произвольной формы, Arbitrary Waveform Generator (AWG).

В основе AWG лежит технология прямого синтеза Direct Digital Synthesis (DDS): цифровой эквивалент сигнала последовательно считывается из блока памяти, поступает на вход цифроаналогового преобразователя, который тактируется от внутреннего или внешнего опорного генератора. Далее сигнал сглаживается фильтром нижних частот (ФНЧ), усиливается (при необходимости) и подается на выходной порт генератора. AWG содержит большой объем встроенной памяти, необходимой для генерации неперiodических сигналов.

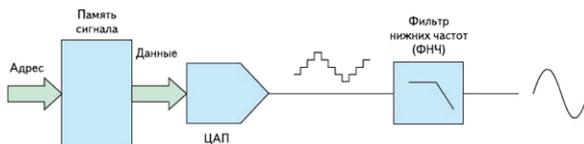


Рис. 1. Технология прямого синтеза

AWG с полосой частот 15 ГГц и выше в мире сегодня предлагают только две компании: Keysight (США) и Tektronix (США). Японские компании, части концерна Fujitsu, покинули этот рынок около пятнадцати лет назад, сейчас основным поставщиком в нишевых решениях является компания Tektronix. Лучший немецкий производитель генераторов Rohde&Schwarz также не выпускает сегодня собственных AWG. Китайские производители демонстрируют быстрый рост производства и разработки приборов, но на сегодня они не предлагают конкурентных решений.

Компании Keysight и Tektronix полностью покинули российский рынок в 2022 году. Б/у AWG на 15+ ГГц в продаже практически нет.

Все что сегодня доступно в России — это перепродажа приборов, купленных ранее, и серый импорт, который существенно осложнен строгой политикой лицензирования и контроля распространения оборудования от Keysight и Tektronix.

В настоящей работе мы представляем разработанный нами одно- и двухканальный OEM-блок AWG на 15+ ГГц, предназначенный для встраивания в контрольно-измерительное оборудование, а также одно- и двухканальный генератор в сборе.

MaltAWG15 имеет высокопроизводительную ПЛИС (FPGA), содержащую 1 млн логических ячеек и 2000 DSP блоков, подключенную к специализированной заказной микросхеме-генератору (ASIC) широким интерфейсом, позволяющим генерировать сигналы произвольной формы в реальном времени в соответствии с алгоритмом, заложенным в ПЛИС. Дополнительный интерфейс от ПЛИС к FMC+ разъему на массиве SERDES позволяет подключать к MaltAWG15 внешний цифровой источник сигналов произвольной формы, работающий в реальном времени. Разъем FMC+ может быть использован для подключения к хост-системе через стандартные интерфейсы, например PCIe или 10/25GE. На передней стороне блока установлен выходной разъем генератора и разъем для приема тактового сигнала. Справа на блоке размещены дополнительные RF-разъемы типа 2.92 для подключения триггеров, расширенных схем тактирования и синхронизации. MaltAWG15 позволяет объединять до четырех блоков для генерации когерентных сигналов. На задней стороне блока размещены низко-частотные отладочные разъемы, в том числе разъем типа JTAG для работы с ПЛИС.

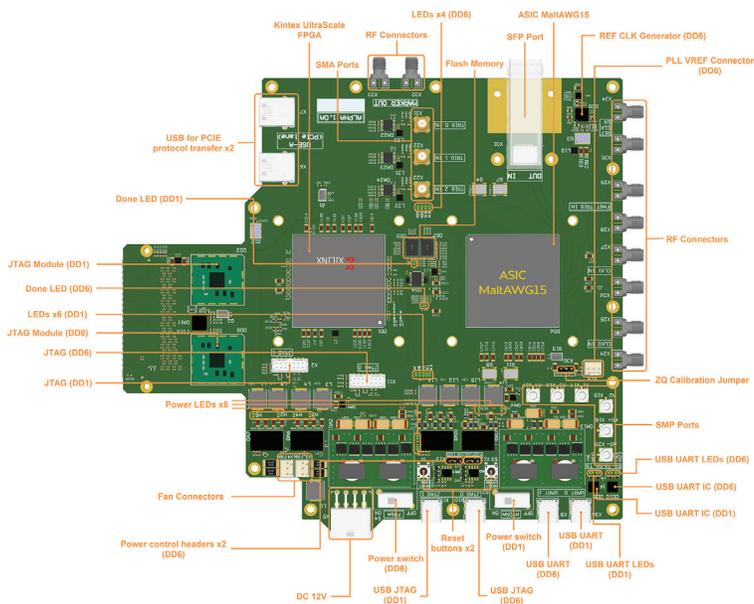


Рис. 2. Внешний вид OEM-блока MaltAWG15

Технические характеристики MaltAWG15:

- полоса выходного аналогового тракта — 16 ГГц;
- производительность — 32 ГВыб/с;
- один канал или два канала;
- возможность синхронизации до 4 каналов;
- номинальное разрешение — 8 бит;
- реальное разрешение (ENOB) 5–7 бит;
- выход — 50 Ом, SMA;
- объем памяти для хранения выборки — 4 Мбайта, расширяется до 8 Гбайт;
- режимы работы: непрерывный из памяти, по триггеру из памяти, прямой синтез в ПЛИС.

Принципиальное отличие предлагаемого нами решения от конкурентов — это открытость и возможность перепрограммирования встроенного ПЛИС. Мы передаем нашим клиентам исходные коды всех базовых прошивок к ПЛИС, предлагаем базовое ПО генератора AWG в исходном коде.



УДК 621.3.049.77

Разработка активных RFID-датчиков для контроля изоляторов воздушных линий электропередач

Хвостов Ю. М., Зубков В. И., Данилов В. А.

ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а
info@nm-tech.org

В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с разработкой активных RFID-датчиков для контроля изоляторов воздушных линий электропередач. Современные воздушные линии электропередач (ВЛЭП) требуют регулярного и надежного мониторинга состояния изоляции для обеспечения надежности и безопасности энергоснабжения. Одним из перспективных методов является использование активных RFID-датчиков, которые позволяют осуществлять непрерывный контроль за состоянием изоляторов путем анализа токов утечки для обнаружения неисправностей.

Ключевые слова: активные RFID-метки; воздушные линии; контроль изоляторов; UHF RFID; LF RFID.

Воздушные линии электропередач представляют собой критически важный элемент энергетической инфраструктуры. Состояние изоляторов напрямую влияет на надежность всей системы. Традиционные методы диагностики, как правило, требуют значительных расходов времени и ресурсов, а также специализированный персонал. Применение активных RFID-меток позволяет значительно упростить и ускорить процесс контроля.

Принцип работы активной RFID-метки для контроля изоляторов основан на размещении пассивных RFID меток (UHF RFID и LF RFID) на каждом изоляторе. При возникновении неисправности изолятора, RFID-метка активирует сигнал тревоги на основе аномалий утечки тока. Поскольку токи утечки увеличиваются с течением времени, активные метки могут использовать энергию этих токов для своего питания и передачи данных о состоянии изоляторов.

Пассивные RFID метки не имеют собственного источника питания и активируются энергией, полученной от RFID-ридера. Их используют для мониторинга в разного рода системах, но возможность применения в высоковольтных сетях ограничена.

Активные RFID метки, напротив, оснащены встроенным источником питания, что позволяет осуществлять постоянный мониторинг и передачу данных о состоянии изоляторов. Активные RFID-метки, установленные на изоляторах, должны соответствовать ряду технических требований. Во-первых, они должны быть устойчивы к воздействию климатических изменений и электромагнитных помех. Во-вторых, система должна обеспечивать надежную связь с центральной системой мониторинга даже на значительных расстояниях. Используемый диапазон частот для RFID-меток включает UHF (800 MHz — 1 GHz) для передачи данных на значительные расстояния и LF (100—150 kHz) для связи в условиях значительных помех.

В ходе реализации данного метода предусмотрено использование энергии токов утечки для питания RFID-меток. С учетом того, что токи утечки имеют свойство увеличиваться со временем, особенно в условиях старения изоляционных

материалов, это решение является экономически выгодным и технически обоснованным.

Активные RFID-метки периодически посылают пакеты данных о состоянии изоляторов в центральную систему мониторинга, что позволяет оперативно реагировать на возникающие проблемы и проводить своевременное техническое обслуживание.

Разработка и внедрение активных RFID-меток для контроля изоляторов воздушных линий электропередач открывают новые возможности для улучшения надежности электрических сетей.

Применение данного метода позволяет не только сократить затраты на обслуживание, но и значительно повысить скорость и точность диагностики состояния изоляторов. Активные метки периодически передают данные о состоянии изоляторов, такие как величина токов утечки, непосредственно на центральный контроллер. Это позволяет своевременно выявлять и устранять неисправности, предотвращая аварии и обеспечивая безопасность эксплуатации ВЛЭП.

Интеграция технологий UHF RFID и LF RFID в систему мониторинга обеспечивает высокую дальность и надежность связи, что является ключевым фактором для эффективного контроля.

УДК 621.374.4

Параметрический умножитель частоты с низким уровнем вносимого фазового шума

Баринов Д. А., Гурьянов Н. О.

АО «Микроволновые системы»

105122, г. Москва, Щелковское ш., 5, стр. 1

Представлены результаты разработки, изготовления и испытаний макета умножителя частоты на основе варикапа с резким переходом с низким уровнем вносимого фазового шума.

Ключевые слова: умножитель частоты; варикап; SPICE-модель; эксперимент; фазовый шум; спектр; нелинейная емкость.

Для современных радиолокационных систем и высокоскоростных устройств дискретизации радиосигналов требуются высокостабильные генераторы опорной частоты СВЧ-диапазона с низким уровнем фазового шума [1].

В большинстве случаев опорные генераторы строятся по принципу умножения частоты низкочастотных кварцевых генераторов, что приводит к ухудшению фазового шума на $20 \log(N)$, где N — коэффициент умножения частоты. Наиболее низким уровнем вносимого фазового шума обладают пассивные (диодные) умножители частоты. Из-за больших потерь при умножении уровень выходного сигнала таких умножителей мал, что приводит к применению буферного каскада, который вносит дополнительный фазовый шум при больших отстройках от несущей [2].

В типичных умножителях частоты обычно применяются кремниевые диоды Шоттки. Однако такие умножители имеют низкий КПД — отношение выходной мощности умножителя к входной мощности накачки. Умножители частоты на диодах Шоттки имеют следующие типичные значения коэффициентов преобразования для гармоник входной частоты: 2-я гармоника -10 дБ, 3-я гармоника -15 дБ, 4 и 5-я гармоники $-20 \dots -25$ дБ [3].

Результаты моделирования показывают, что схема умножения частоты на варикапе с резким переходом позволяет получить высокий КПД и тем самым избежать необходимость применения буферного каскада, вносящего дополнительный фазовый шум. В умножителях этого типа генерация гармоник частоты накачки происходит за счет нелинейной емкости p - n перехода большой крутизны. В варикапе используется нелинейность барьерной емкости закрытого перехода, которая относительно не велика, и, следовательно, не велики значения накапливаемых зарядов и пропускаемых токов. Соответственно мала преобразуемая варикапом мощность. Поэтому на практике для умножения частоты используют режим диода, в котором он работает с заходом в область прямых смещений, но без открывания p - n перехода. В таком режиме к барьерной емкости перехода добавляется диффузионная емкость, которая на несколько порядков превышает барьерную. В результате существенно возрастает преобразуемая параметрическим умножителем мощность [4].

Используя разработанную SPICE-модель выбранного варикапа с резким переходом, был смоделирован и изготовлен макет умножителя частоты 120 МГц кратностью 5, а также проведено экспериментальное исследование. Разработанная SPICE-модель варикапа, обеспечивает высокую точность совпадения

с результатами измерений макета умножителя. В результате эксперимента был получен низкий уровень спектральной плотности мощности фазового шума выходного сигнала, а коэффициент преобразования умножителя составил $-13,5$ дБ при входной мощности накачки 18 дВт, что на порядок превосходит КПД умножителя на кремниевых диодах Шоттки той же кратности.

Разработанный умножитель на варикапе с резким переходом может быть использован для повышения частоты кварцевого генератора с низким уровнем фазового шума.

Литература

1. Астапенко Д. В., Ложников А. О. Уменьшение фазовых шумов генераторов на основе ПАВ-резонаторов // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах, 2018. — С. 98–102.
2. Жаботинский М. Е., Свердлов Ю. Л. Основы теории и техники умножения частоты. — М.: Советское радио, 1964. — 327 с.
3. Бруевич А. Н. Умножители частоты. — М.: Советское радио, 1970. — 248 с.
4. Зикий А. Н., Зламан П. Н. Варакторный умножитель частоты 400 МГц // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2018. — № 3. — С. 98–102.



УДК 621.3.049.77

Проектирование устойчивых к возбуждению монолитных СВЧ-усилителей на основе корректирующих цепей амплитудно-частотной характеристики

Дудинов К. В., Заднепрная Н. И.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

kvudinov@istokmw.ru

В данной статье рассматривается проектирование цепей коррекции амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) с возможностью повышения устойчивости СВЧ-усилительного каскада как в рабочем диапазоне частот, так и за его пределами.

Ключевые слова: GaAs; рНЕМТ; МИС СВЧ; коэффициент устойчивости.

Введение

Как правило СВЧ полевой транзистор имеет спадающую зависимость коэффициента усиления от частоты (см. рис1). Поэтому при проектировании усилителя на этих активных элементах в заданной рабочей полосе, как правило, требуется создание таких согласующих цепей по входу и по выходу транзистора, которые на верхней рабочей точке обеспечивают максимальные усиление и выходную мощность, а на нижних частотах соответствующее подавление сигнала, так чтобы получить достаточно ровную амплитудно-частотную характеристику в рабочей полосе. Одновременно с этим необходимо обеспечить безусловную устойчивость всех каскадов, входящих в разрабатываемый усилитель. Причем усилитель должен быть устойчив к возбуждению не только в рабочей полосе частот, но и вне рабочей полосы, особенно на нижних частотах, где транзистор имеет самое высокое усиление.

Наиболее простой способ оценки стабильности усилительного каскада является расчет инвариантного коэффициента устойчивости [1]:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2 \cdot |S_{12} \cdot S_{21}|}, \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta = S_{11} \cdot S_{22} - S_{21} \cdot S_{12} \quad (2)$$

и в случае выполнения следующей системы неравенств [2, 3]:

$$K \geq 1, \quad |\Delta| \leq 1, \quad (3)$$

в малосигнальном режиме усилитель будет устойчив.

Выбор параметров стабилизирующего резистора

В данной работе рассматривается способ повышения устойчивости усилительных каскадов усилителя путем введения диссипативных потерь во входную цепь усилительного каскада. Пример использования стабилизирующего резистора для повышения устойчивости транзистора на одной конкретной частоте показан на рис. 2.

Для решения этой задачи таким способом в широкой полосе частот ($0, f_{\max}$) необходимо чтобы величина этого резистора могла меняться в зависимости от частоты, так для частоты близкой к нулю его величина может быть более 1 кОм,

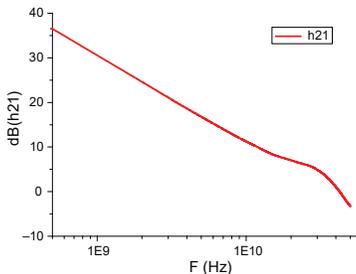


Рис. 1. Зависимость Н21 СВЧ-транзистора от частоты

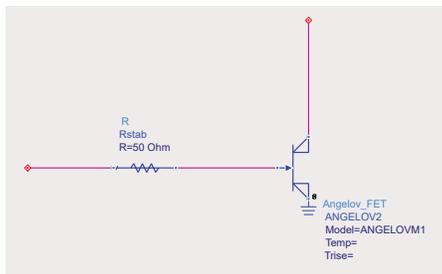


Рис. 2. Пример введения стабилизирующего резистора во входной цепи СВЧ-транзистора

а на высоких частотах около 0,1 Ом. Для каждого типа транзистора (в зависимости от технологии, ширины затвора и др.) параметры стабилизирующего резисторы могут быть разные. Рассмотрим СВЧ-транзистор с шириной затвора около 1 мм, выполненный по технологическому процессу РНЕМТ на GaAs с нормой 0,25 мкм в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Анализ устойчивости работы транзистора в широкой полосе частот показал, что частотная зависимость величины стабилизирующего резистора должна быть как показана на рис. 3.

Выбор корректирующей цепи АЧХ усилительного каскада

Использование на входе цепи с последовательным соединением индуктивного и емкостного элементов

$$\omega L - \frac{1}{j\omega C} = 0, \tag{4}$$

для $\omega = 2\pi \cdot f_{\max}$

позволяет обеспечить минимум потерь на верхней частоте заданного диапазона частот и увеличение рассогласование вне рабочей полосы как на нижних частотах так и на верхних частотах. Охват этих реактивных элементов резистором как показано на рис. 4, позволяет ввести диссипативные потери и этим самым повысить устойчивость усилительного каскада. Сопротивление такой корректирующей цепи:

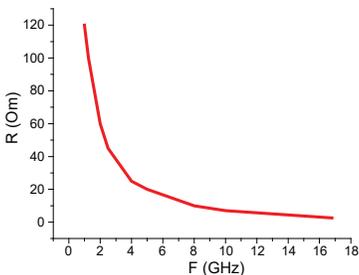


Рис. 3. Параметры стабилизирующего резистора

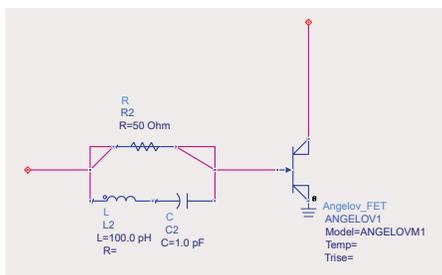


Рис. 4. Корректирующая цепь АЧХ усилительного каскада

$$Z_{21 \text{ кор}} = \frac{\left(\omega L - \frac{1}{j\omega C}\right)^2 R}{\left(\omega L - \frac{1}{j\omega C}\right)^2 + R^2} + j \cdot \frac{\left(\omega L - \frac{1}{j\omega C}\right) \cdot R^2}{\left(\omega L - \frac{1}{j\omega C}\right)^2 + R^2}. \quad (5)$$

При оптимальном выборе параметров L, C и R мы можем получить реальную часть уравнения (5) очень близкую к требуемому (см. рис. 5).

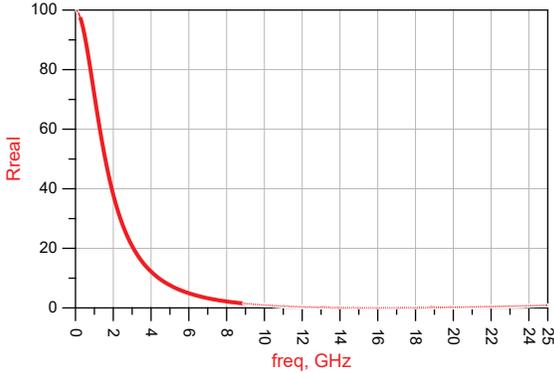


Рис. 5. Реальная часть уравнения (5), которая соответствует необходимому частотно-зависимому стабилизирующему резистору

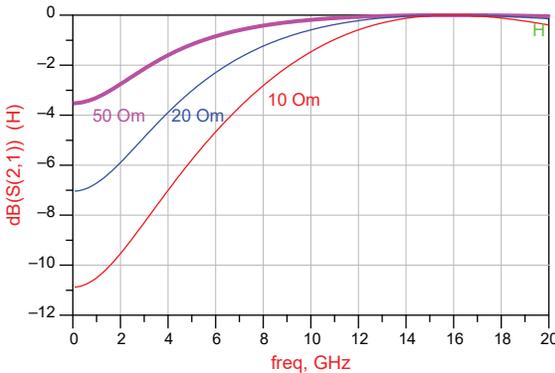


Рис. 6. Передающая характеристика корректирующей цепи в зависимости от входного сопротивления транзистора

Использование этой корректирующей цепи на входе транзистора позволяет реализовать задачу как коррекции АЧХ, так и обеспечения устойчивости в мало-сигнальном режиме. Входное сопротивление СВЧ-транзистора достаточно малое,

что и еще более усилить эффект подавления сигнала вне заданной рабочей полосы усилителя.

Реализация корректирующей цепи АЧХ в усилителях 4 Вт в X-диапазоне

Выше представленный расчет цепей коррекции амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) был применен при разработке усилителя 4 Вт в X-диапазоне. Усилитель был изготовлен на основе технологического процесса РНЕМТ на GaAs с нормой 0,25 мкм в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Результаты измерения представлены на рис. 7.

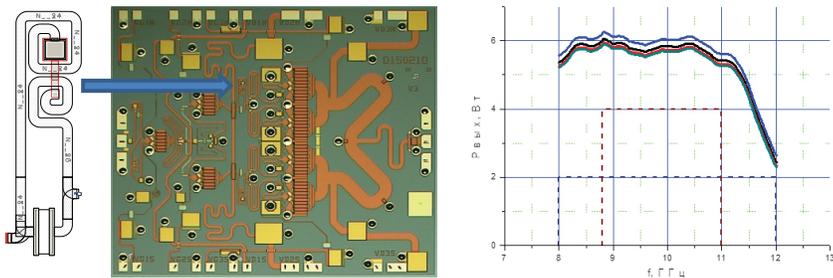


Рис. 7. Реализация цепей коррекции АЧХ с повышенной устойчивостью СВЧ-усилительных каскадов в выходном усилителе мощности 4 Вт X-диапазона

Заключение

Рассмотрен способ проектирования цепей коррекции АЧХ с повышенной устойчивостью СВЧ-усилительных каскадов как в рабочем диапазоне частот, так и за его пределами. С использованием таких цепей коррекции амплитудно-частотной характеристики был разработан МИС СВЧ-усилитель с использованием отечественного технологического процесса РНЕМТ на GaAs с нормой 0,25 мкм. Реализованные МИС СВЧ-усилитель обеспечивает выходную мощность более 4 Вт в X-диапазоне.

Литература

1. Rollett J. Stability and Power-Gain Invariants of Linear Twoports // IRE Transactions on Circuit Theory. Vol. 9. Iss. 1. March 1962. P. 29–32.
2. Besser L., Gilmore R. Practical RF circuit design for modern wireless systems: Passive circuits and systems. Vol. 2. London-Boston: Artech House, 2003. P. 569.
3. Woods D. Reappraisal of the unconditional stability criteria for active 2-port networks in terms of s-parameters // IEEE Trans. on CAS, 1976. Vol. 23. № 2. P. 73–81.



УДК 621.3.049.776.422: 621.3.049.76

Исследование влияния элементов конструкции на паразитное электромагнитное излучение малогабаритных СВЧ модулей

Болгов С. Ю., Волосов А. В., к. т. н., Кривошеев А. В., Матвеев В. С.,
Панасенко П. В., д. т. н., Россов А. С.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
avolosov@niime.ru

В работе исследуется влияние конструктивных элементов СВЧ-тракта на характеристики миниатюрного приемо-передающего модуля. В результате исследований было получено амплитудно-частотное распределение паразитной излучаемой мощности для различных вариантов конструкции модуля.

Ключевые слова: СВЧ; приемо-передающий модуль; кремниевый интерпозер.

Проблемы электромагнитного моделирования миниатюрных многокомпонентных СВЧ модулей определяются в том числе тем, что компоненты, входящие в их состав, кардинально различаются по размерам и функциональному назначению. Это приводит к тому, что построение модели, полностью идентичной реальному модулю, занимает очень много времени, а сам процесс электромагнитного моделирования, как правило, не может быть реализован на компьютерах с доступной вычислительной мощностью.

В настоящей работе было выполнено электромагнитное моделирование приемо-передающего модуля (ППМ) мм-диапазона, изготовленного по гибридной технологии на основе кремниевых интерпозеров. Трехмерная модель ППМ приведена на рис. 1.

Основные упрощения электромагнитной модели:

- моделируются только СВЧ контактные площадки цепей МИС;
- СВЧ-разъемы по входу/выходу ППМ в модели отсутствуют;
- модуль установлен на бесконечном проводящем экране, со всех других сторон используются открытые границы.

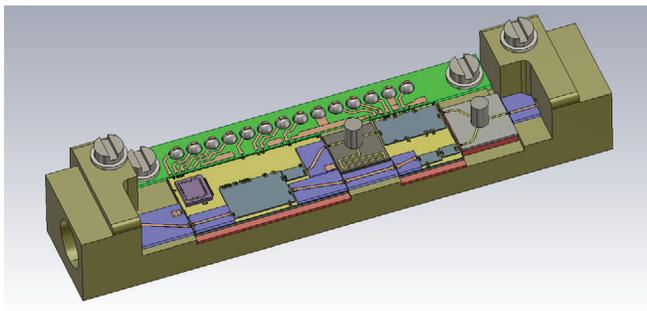


Рис. 1. Внешний вид модели ППМ (защитная крышка не показана)

В качестве объекта исследования выступает ППМ, работающий в диапазоне 33,0–34,0 ГГц.

В ходе электромагнитного анализа 3D-модели исследовалось влияние объемного элемента (ферромагнитного вентиля) на картину электромагнитного поля вокруг исследуемого объекта.

На основе сравнительного анализа моделей получено амплитудно-частотное распределение паразитной излучаемой мощности различных конструкций приемно-передающих модулей.

Диаграмма направленности излучения ППМ в режиме передачи в одном из вариантов исполнения приведена на рис. 2.

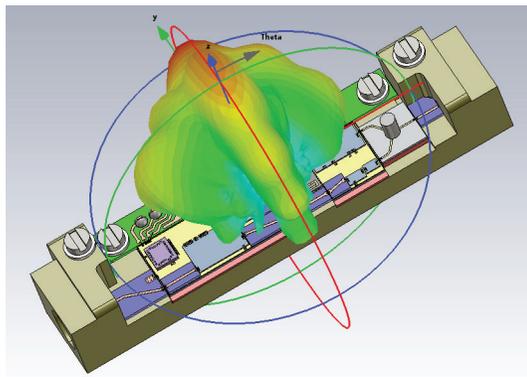


Рис. 2. Диаграмма направленности паразитного излучения ППМ в режиме передачи

В работе приведены результаты моделирования различных конструктивных исполнений ППМ. Также приведено сопоставление результатов моделирования с результатами измерений характеристик натурных образцов.

Таблица 1. Основные измеренные характеристики ППМ разработанного на основе модели

Наименование параметра, единица измерения	Обозначение параметра	Ка диапазон
Полоса рабочих частот, ГГц	ΔF	33–34
Импульсная выходная мощность передающего (ПРД) канала при входной мощности 1 мВт, Вт	$P_{\text{вых}}$	0,8
Коэффициент усиления приемного (ПРМ) канала, дБ	K_y	28–33
Коэффициент шума ПРМ канала, дБ, не более	$K_{\text{ш}}$	5,0
Количество разрядов аттенюатора	n_a	5
Количество разрядов фазовращателя	n_ϕ	5
Минимальный фазовый дискрет, град	Φ_{MIN}	11
Шаг ослабления аттенюатора, дБ	A_{MIN}	0,6
Размеры ППМ, мм	$D \times Ш \times B$	38×7×7

*Литература*

1. Красников Г. Я., Панасенко П. В., Волосов А. В. Конструктивно-технологические принципы создания СВЧ-элементной базы нового поколения на основе объемных технологий современной кремниевой микроэлектроники 666// Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 3 (163). — С. 10–22.
2. Панасенко П. В., д. т. н., Волосов А. В., к. т. н., Ионов А. С., Красников Г. Я., академик РАН, д. т. н., Петров А. В., к. т. н. Малогабаритные мощные приемо-передающие модули X-диапазона для АФАР // Наноиндустрия, 2020. Спецвыпуск (4s). — Т. 13. — С. 404–406.

УДК 621.382.2/3

Преобразователь последовательного кода в параллельный для применения в многофункциональных GaAs СВЧ МИС

Иванов А. В., Кондратенко А. В., Сорвачев П. С., Щербаков А. С.

АО «Микроволновые системы»

105122, г. Москва, Щелковское ш., 5, стр. 1

sps@mwsystems.ru

Представлены результаты разработки и тестирования функционального блока последовательно-параллельного драйвера управления, выполненного на основе GaAs технологического процесса. Разработанный преобразователь кода можно как интегрировать в состав различных МИС СВЧ, так и реализовать в виде отдельного кристалла, где гибридная сборка более выгодна.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема; технологический процесс GaAs pHEMT; последовательно-параллельный интерфейс управления.

Проект последовательно-параллельного драйвера управления реализован на опциональных E/D-транзисторах с длиной затвора 0,5 мкм, которые входят в основной технологический процесс, в основе которого лежат нормально открытые GaAs полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов, имеющие длину затвора 0,15 мкм. Схемотехническая основа последовательно-параллельного драйвера ограничена рядом логических элементов, такими как инвертор, 2Или-Не, 3Или-Не, 2И-Не. Из них собирается входная функциональная схема, состоят D-триггеры и схемы мультиплексоров. Из D-триггеров образуются регистры сдвига и хранения, выполняющие главную функцию — преобразование кода из последовательного в параллельный. Схемы мультиплексоров позволяют выбирать (в зависимости от режима работы прием/передача приемо-передающего модуля (ППМ)) необходимый набор загружаемых бит данных. Все необходимые логические элементы реализованы на основе семейства DCFL-логики на полевых транзисторах (логические схемы с непосредственными связями). Основные преимущества его использования по сравнению с другими логическими семействами, это простота реализации и низкое потребление тока [1, 2].

Реализация цифровых схем управления в технологическом базисе A^3V^5 имеет как преимущества, так и недостатки. К явному недостатку можно отнести отсутствие полевых транзисторов с дырочным типом проводимости канала (канал r-типа), что ограничивает схемотехнические возможности. В результате, схемы управления, реализованные в GaAs технологическом базисе, получают больших размеров и имеют большее потребление по сравнению с схемами управления реализованными по Si технологическому процессу, где имеется полноценная комплементарная пара полевых транзисторов. Однако, при рассмотрении задачи с точки зрения интеграции на один GaAs кристалл СВЧ части и цифровой части управления функциональными СВЧ узлами, можно отметить следующие преимущества: уменьшение габаритных размеров всей системы ППМ, исключение большого числа сварных межсоединений по линиям управления, как следствие увеличение технологичности сборки и снижение себестоимости производства.

В докладе представлены результаты разработки, тестирования функционального блока последовательно-параллельного драйвера управления и примеры



использования в внутренних проектах компании АО «Микроволновые системы». В одном проекте, разработанный преобразователь используется интегрально на одной монолитной интегральной схеме (МИС) с СВЧ частью векторного модулятора Ku-диапазона частот. Здесь также осуществлена дополнительная функция — в МИС имеется выход переноса, позволяющий осуществить загрузку данных в последовательно соединенные N количество векторных модуляторов за один цикл. Такое решение позволяет сэкономить место в ППМ за счет исключения ряда линий управляющих сигналов. В другом проекте, преобразователь кода выступает как отдельная МИС, предназначенная для совместной работы с МИС векторного модулятора X-диапазона частот с параллельным интерфейсом управления. Проект был выполнен в рамках модернизации уже существующего ППМ для замены достаточно громоздких сдвиговых регистров. Подобное решение позволяет сэкономить место в модернизированном ППМ.

Литература

1. Bentini A. et al. Design and realization of GaAs digital circuit for mixed signal MMIC implementation in AESA applications // International Journal of Microwave Science and Technology, 2011. P. 1–11.
2. Wang K. et al. Design of a low-insertion-phase-shift MMIC attenuator integrated with a serial-to-parallel converter // IEICE Electronics Express, 2017. P. 1–7.

УДК 621.3.011.73

Синтез СВЧ интегральных ступенчатых аттенуаторов и фазовращателей в интеллектуальной САПР «Смекалец»

Горяинов А. Е., Добуш И. М., Калентьев А. А., Сальников А. С., Файль Т. Н., Юлаев А. А., Метель Ю. А., Набережнев Н. А., Швовев В. С., Кабанова Е. В., Метель А. А.

ООО «50ом Технолоджиз»

634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 147

alexey.kalentyev@50ohm.tech

В докладе представлено описание подходов, используемых в интеллектуальной САПР СВЧ интегральных схем «Смекалец». В качестве примера показано ее применение для синтеза схемных решений ступенчатых аттенуатора и фазовращателя на библиотеке стандартных элементов 0,25 мкм GaAs рНЕМТ-технологии АО «Светлана-Рост».

Ключевые слова: интеллектуальная САПР; синтез схемного решения; ступенчатый аттенуатор; ступенчатый фазовращатель; СВЧ МИС; дубликат PDK.

Введение

Рост вычислительных мощностей, доступных разработчикам СВЧ ИС, вместе с развитием методов искусственного интеллекта открывают новые возможности по созданию интеллектуальных инструментов, что в свою очередь значительно увеличивает производительность труда и сокращает цикл от идеи до изготовления изделия [1]. В докладе представлено описание подхода к синтезу СВЧ интегральных ступенчатых аттенуаторов и фазовращателей (СА и СФ), используемого в интеллектуальной САПР «Смекалец».

В инженерной практике существует множество СВЧ ИС, отличающихся широкой номенклатурой технических характеристик, технологиями изготовления и областью применения. Разработка интеллектуальной САПР в своей основе должна иметь способы «оцифровки» задач проектирования различных устройств для дальнейшего поиска решений с использованием выбранного метода ИИ. Высокую эффективность показывает подход, заключающийся в формировании морфологического множества проектируемых устройств [2, 3]. В качестве интеллектуальных алгоритмов, позволяющих исследовать многомерные поисковые пространства электрических схем с множеством локальных оптимумов, хорошо себя показали эволюционные алгоритмы [3, 4]. Для практического использования интеллектуальной САПР необходимо обеспечить возможность использования моделей СВЧ-компонентов из библиотек фаундри-компаний.

Сочетание описанных выше компонентов позволило разработать прототипы программных модулей для синтеза схемных решений СВЧ ИС, а также верифицировать их на практике [5–7], в их числе: малошумящие усилители, усилители с распределенным усилением, коммутаторы, секции ступенчатых аттенуаторов и фазовращателей. Следует отметить значительное сокращение времени разработки схемных решений СВЧ ИС с нескольких месяцев/недель до нескольких дней/часов.

Интеллектуальная САПР

Рассмотрим проектирование интегральных СА и СФ. На первом этапе, выполняется проектирование отдельных разрядов, требования предъявляются к комплексу



электрических характеристик: коэффициенты отражения и передачи, ошибки по амплитуде и фазе. На втором этапе инженер переходит к соединению ранее разработанных разрядов и может руководствоваться различными критериями: удобство топологической компоновки, коэффициенты отражения, вносимые потери, среднеквадратичные отклонения ошибок по амплитуде и фазе.

По результатам этой работы коллективом авторов разработана доступная для закрытого бета-тестирования интеллектуальная САПР «Смекалец», включающая модули синтеза для СВЧ СА и СФ, а также модуль определения оптимальной последовательности соединения разрядов. Модули синтеза позволяют учесть требования к комплексу электрических характеристик используя модели из библиотеки элементов фаундри-компании, провести экспорт решения в коммерческую САПР СВЧ-устройств полного цикла для финальной доработки и ЭМ-анализа топологии, подготовки чертежей фотомасштабов.

В докладе представлен пример проектирования 0,1–30 ГГц шестиразрядного СА и 9–11 ГГц четырехразрядного СФ на основе технологического процесса 0,25 мкм GaAs pHEMT АО «Светлана-Рост».

Заключение

В докладе представлено описание подходов, используемых при разработке интеллектуальной САПР СВЧ интегральных схем «Смекалец» и ее применение для синтеза схемных решений СА и СФ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06401.

Литература

1. Synopsys, Cadence, Google And NVIDIA All Agree: Use AI To Help Design Chips. Forbes. 2021 (Aug).
2. Акимов С. В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза // Доклады ТУСУР, 2011. — № 2-2 (24). — С. 204–211.
3. Kalentyev A. A., Babak L. I., Garays D. V. Genetic-algorithm-based synthesis of low-noise amplifiers with automatic selection of active elements and DC biases // 2014 9th EuMIC // IEEE, 2014. P. 520–523.
4. Zebulum R. S., Pacheco M. A., Vellasco M. M. Evolutionary electronics: automatic design of electronic circuits and systems by genetic algorithms. CRC press, 2018. 304 p.
5. Калентьев А. А., Добуш И. М., Горяинов А. Е., Сальников А. С. Интеллектуальная САПР «Смекалец»: быстрый и простой синтез СВЧ интегральных схем // Электроника НТБ, 2022. — № 3 (214). — С. 76–81.
6. Горяинов А. Е., Добуш И. М., Калентьев А. А., Сальников А. С., Файль Т. Н., Юлаев А. А., Метель Ю. А., Набережнев Н. А., Швоев В. С., Кабанова Е. В., Метель А. А. Интеллектуальная САПР СВЧ интегральных схем «Смекалец» и ее применение для синтеза малошумящих усилителей // Российский форум «Микроэлектроника-2023» 9-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов, 2023. — С. 401–402.
7. Сальников А. С., Билевич Д. В., Метель А. А., Калентьев А. А. Реализации симметрии и сегментированных линий в алгоритме синтеза топологии СВЧ-коммутаторов // Электроника и микроэлектроника СВЧ, 2024. В печати.

УДК 621.389

От идеи разработки нового типа ферритового циркулятора к организации производства СВЧ электроники

Семенов Д. А., Сквородников С. В.*ООО «СДС Электроникс»**192241, г. Санкт-Петербург, ул. Софийская, 66**sds@sds-e.net*

Описан процесс создания производства СВЧ-приборов в основе которых лежит технология flip-chip. Приведены компетенции, направления развития компании и последние достижения в области разработки СВЧ-устройств с контактами типа flip-chip.

Ключевые слова: flip-chip; ферритовый циркулятор; СВЧ; поверхностный монтаж; электронные компоненты.

Основной идеей компании «СДС Электроникс» является разработка и производство СВЧ ферритовых развязывающих устройств с контактами типа flip-chip. Идея разработки СВЧ ферритовых развязывающих устройств у коллектива ООО «СДС Электроникс» появилась благодаря:

1) опыту контрактного производства электроники, полученному еще в студенческие годы на заводе «Elcoteq», где в больших количествах производилась установка цифровых микросхем с контактами типа BGA и flip chip, а также производился их ремонт;

2) опыту разработки и организации производства СВЧ ферритовых приборов;

3) опыту работы на рынке поставок электронных компонентов и печатных плат, в том числе СВЧ.

Более подробно познакомиться с выпускаемыми ООО «СДС Электроникс» СВЧ-приборами с контактами типа flip-chip можно в публикации журнала «Электроника НТБ «Особенности реализации технологии flip-chip при производстве СВЧ-приборов на примере ферритового SMD-циркулятора» № 7 2022 г. [1]. Познакомиться с производством можно также в публикации Ковалевского Ю. С. журнала «Электроника НТБ «Полный цикл изготовления уникальных для российского рынка СВЧ-изделий. Визит на производство компании «СДС Электроникс» [2].

Одним из путей развития компания ООО «СДС Электроникс» видит знакомство разработчиков СВЧ систем с принципами проектирования и расчета СВЧ-приборов с контактами типа flip-chip и технологией их производства. Приведен пример успешного сотрудничества в данном направлении.

Приведены результаты последних испытаний разрабатываемых и выпускаемых СВЧ ферритовых развязывающих приборов на высокий уровень мощности в X диапазоне.

Литература

1. Сквородников С. В., Семенов Д. А. Особенности реализации технологии flip-chip при производстве СВЧ-приборов на примере ферритового SMD-циркулятора // ЭЛЕКТРОНИКА НТБ, 2022. — № 7 — С. 130. DOI: 10.22184/1992-4178.2022.218.7.130.132.



2. Ковалевский Ю. С. Полный цикл изготовления уникальных для российского рынка СВЧ-изделий. Визит на производство компании «СДС Электроникс // ЭЛЕКТРОНИКА НТБ, 2023. — № 5. — С. 40. DOI: 10.22184/1992-4178.2023.226.5.40.48.

УДК 621.3.049

Особенности оптимизации параметров МИС СВЧ управляемых полосовых фильтров при моделировании

Дрозденко Е. С., Суворов А. И.

ФГУП «НПП «Гамма»

117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 78, стр. 4

drozdenko.es@nppgamma.ru

Рассмотрены особенности задания целей оптимизации при проектировании электрически перестраиваемых СВЧ фильтров. На примере схемы полосового гребенчатого фильтра 3-го порядка показано, что управляемый аналоговым способом СВЧ фильтр в рамках рНЕМТ и НВТ технологического процесса возможно одновременно оптимизировать по параметрам полосы перестройки, коэффициента передачи, полосы пропускания и полосы заграждения. Во второй части сообщения приводятся особенности проектирования рНЕМТ и НВТ ключей в составе управляемого фильтра.

Ключевые слова: НВТ; НЕМТ; варикап; СВЧ фильтр; управляемый фильтр; оптимизация; ключ.

Для снижения массогабаритных характеристик в современных радиоэлектронных системах применяются электрически перестраиваемые фильтры, построенные по твердотельной технологии на GaAs подложке.

Основными динамическими параметрами при проектировании электрически перестраиваемого фильтра является диапазон его перестройки, коэффициент передачи, ширина полосы пропускания и подавления. В случае проектирования линейки фильтров в рамках разных технологических процессов (НВТ и рНЕМТ) и при возможности использования типовой схемы фильтра заданного порядка на данных частотах, целесообразно использование оптимизации по указанным параметрам вместо ручной подстройки размеров каждой литеры. В данном случае параметры задаются уравнениями, в которых участвуют встроенные функции конкретной САПР. В первой части доклада на примере САПР AWR и ADS показан вариант реализации подобных уравнений.

При проектировании электрически перестраиваемых фильтров с несколькими каналами ставится задача создания СВЧ ключей на имеющейся элементной базе из состава PDK. Во второй части доклада приведены результаты проектирования ключей типа SPDT на гетеробиполярных транзисторах. Для получения изоляции между каналами более 30 дБ была проведена доработка типовой схемы ключа. Отмечены достоинства и недостатки полученного решения.

Литература

1. Дрозденко Е. С., Кульгашова А. П., Суворов А. И. Электрически перестраиваемые полосовые фильтры в интегральном исполнении // Н.-т. конф. «СВЧ-Электроника 2023», г. Фрязино, сб. тез., 2023. — С. 99–100.



УДК 621.382

На пути к построению моделей отечественных GaN НЕМТ-транзисторов для САПР СВЧ-устройств

Попов А. А.¹, Добуш И. М.¹, Сальников А. С.¹, Дудинов К. В.²,
Емельянов А. М.², Зыков Д. Д.³, Подвигалкина Н. О.³, Зыков В. Д.³

¹ ООО «500m Технолоджиз»

634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 147
artem.popov@500m.tech

² АО «НПП Исток им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
kvdudinov@istokmw.ru

³ ООО «Центр проектирования и технологий полупроводниковых изделий»

123592, г. Москва, ул. Кулакова, 20, корп. 1
d.zykov@i-pdk.ru

В докладе изложено поэтапное описание методологии разработки моделей GaN НЕМТ-транзисторов для САПР СВЧ-устройств, представлены результаты апробации данной методологии на примере транзисторов, изготовленных в АО «НПП Исток им. Шокина».

Ключевые слова: малосигнальная эквивалентная схема; СВЧ-транзистор; САПР; экстракция параметров; тестовая структура.

Введение

В связи с развитием отечественных техпроцессов СВЧ-микрoэлектроники возникает потребность в создании комплексных инструментов проектирования, основой для которых являются математические модели активных и пассивных элементов. На прошлогоднем форуме «Микрoэлектроника-2023» коллектив авторов представил доклад, где были изложены современные требования к разработке и функциональности математических моделей СВЧ-транзисторов, отражена методология и продемонстрирован пример разработки современной нелинейной модели отечественных GaAs рНЕМТ, изготовленных на базе АО «НПП Исток им. Шокина» [1]. В данной работе предложенная ранее методология разработки моделей была апробирована на транзисторах, изготовленных по технологии 0,25 мкм GaN НЕМТ на подложках SiC.

Методология разработки моделей

На первом этапе проводилась разработка специализированных тестовых структур, пригодных для последующей характеристики. Разработанный комплект тестовых структур включал транзисторы с различной периферией затвора как в копланарном, так и в микрополосковом исполнениях. Далее осуществлялась подготовка программы измерений, учитывающей как конструктивные особенности разработанных тестовых структур, так и требования, предъявляемые к функциональности моделей. После изготовления и предварительных измерений тестовых транзисторов по предложенной программе проводился этап выбора репрезентативных кристаллов. Далее осуществлялась детальная характеристика выбранных кристаллов в различных режимах работы, после чего проводилась математическая обработка результатов измерений (исключение влияния контактных площадок и подводящих

линий, устранение выбросов) с последующей экстракцией параметров малосигнальной эквивалентной схемы [2, 3]. В результате была разработана малосигнальная модель GaN HEMT-транзистора, способная воспроизводить результаты измерений S-параметров во множестве рабочих точек.

Заключение

В докладе представлены основные шаги, предпринятые для разработки малосигнальной модели отечественного СВЧ-транзистора, изготовленного по GaN HEMT-технологии на подложке SiC. Работоспособность предложенной ранее методологии подтверждается результатами построения малосигнальной модели транзисторов, изготовленных по новой технологии. В качестве рекомендаций при использовании данной методологии следует отметить необходимость тщательной проработки комплекта тестовых структур для характеристики транзисторов и исключения влияния контактных площадок и подводящих линий. При отсутствии последних также возможно применение электромагнитного анализа топологии, в этом случае параметры подложки должны быть верифицированы на специальных пассивных тестовых структурах.

Литература

1. Попов А. А., Добуш И. М., Сальников А. С. и др. Современные требования к разработке и функциональности моделей СВЧ-транзисторов для проектирования интегральных схем // Российский форум «Микроэлектроника-2023»: 9-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули» (Парк науки и искусства «Сириус», 9–14 октября 2023 г.): Сборник тезисов. — М.: ТЕХНО-СФЕРА, 2023. — С. 409–410.
2. Dambrine G., Cappy A., Heliodore F. et al. A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1988. Vol. 36. № 7. P. 1151–1159. DOI: 10.1109/22.3650.
3. Popov A., Bilevich D., Salnikov A. et al. A combined technique for amplifier oriented small-signal noise model extraction // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020. Vol. 30. № 9. DOI: 10.1002/mmce.22273.



УДК 621.37

Комплект СФ-блоков S-диапазона на основе отечественной 180 нм КМОП-технологии

Коколов А. А., к. т. н., Ходжиков Д. В., Шутов Е. С., Коряковцев А. С.,
Помазанов А. В., Шеерман Ф. И., к. т. н., Бабак Л. И., д. т. н.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
andrei.a.kokolov@tusur.ru*

Представлены результаты экспериментального исследования СФ-блоков S-диапазона на основе отечественной 180 нм КМОП-технологии, в том числе ИС маломощного усилителя (МШУ) и ИС цифрового аттенюатора (ЦАТТ)). Результаты работы подтвердили пригодность указанной технологии для изготовления СВЧ ИС с рабочими частотами до 6–8 ГГц.

Ключевые слова: 180 нм КМОП; ИС; S-диапазон; МШУ; аттенюатор; СВЧ элементы; модели.

Современные системы с АФАР содержат в себе тысячи приемо-передающих модулей (ППМ), поэтому стоимость одного такого модуля является существенным фактором. За рубежом активно используют кремниевые технологии (КМОП/КНИ или SiGe БиКМОП) для разработки специальных многофункциональных (одно- или многоканальных) диаграммообразующих ИС, в том, числе и в S-диапазоне [1]. Кремниевые технологии способны обеспечить довольно средние параметры устройств (такие как, коэффициент шума и удельная выходная мощность), но при этом обладают более высокой степенью интеграции, низким потреблением, повторяемостью характеристик, возможностью реализации многоканальных решений, а также низкой стоимостью при большом количестве изготавливаемых чипов.

В РФ проводились работы по исследованию кремниевых технологий для СВЧ применений, но при этом был использован 180 нм КМОП КНИ техпроцесс [2]. В данном докладе рассматриваются результаты разработки и экспериментального исследования МШУ и ЦАТТ S-диапазона, которые были изготовлены на основе 180 нм КМОП-технологии объемного кремния HCMOS8D предприятия АО «Микрон».

ИС МШУ представляет собой двухкаскадный усилитель, для выравнивания его АЧХ и обеспечения устойчивости используется параллельная обратная связь по напряжению в обоих каскадах. В соответствии с измерениями усилитель обладает следующими характеристиками: полоса частот 2–4 ГГц; коэффициент усиления $G = 21,5 \pm 1,0$ дБ; коэффициент шума $NF < 3,5$ дБ; выходная мощность $P_{1дБ} > 10$ дБм ($V_{ds} = 1,8$ В, $I_{ds} = 48$ мА, $P_{DC} = 86,4$ мВт); коэффициенты отражения $|S_{11}|/|S_{22}| < -11$ дБ; габариты $1,4 \times 0,9$ мм².

ИС 6-битного ЦАТТ (31,5 дБ / 0,5 дБ) построена в виде каскадного соединения 6-ти секций затухания. Согласно экспериментальным данным ИС ЦАТТ обеспечивает следующие характеристики: диапазон частот от 0 до 4 ГГц; потери в начальном состоянии $IL_0 \leq -6,8$ дБ; среднеквадратичная ошибка (СКО) установки амплитуды по всем состояниям $\Delta A < 0,4$ дБ; входная мощность $IP_{1дБ} > 10$ дБм; коэффициенты отражения по входу/выходу $|S_{11}|/|S_{22}| < -12,5$ дБ; габариты $1,88 \times 1,02$ мм².

В рамках изготовленного MPW-запуска были заложены отдельные тестовые элементы (катушки индуктивности, конденсаторы, усилительные и переключаемые транзисторы) в целях исследования точности или построения моделей, а также определения параметров электромагнитного (ЭМ) стека в целях проведения моделирования топологии СВЧ ИС САПР Momentum. В стандартной библиотеке HSMOS8D отсутствуют модели катушек индуктивностей, поэтому предварительно с использованием приближительных электрофизических параметров стека в САПР были рассчитаны различные варианты топологии катушек с номиналами от 0,1 нГн до 2,5 нГн. Измеренные значения индуктивностей соответствуют рассчитанным, но резонансные частоты и добротности отличаются, поэтому в соответствии с полученными данными параметры ЭМ-стека были модифицированы и уточнены. Для усилительных nMOP-транзисторов граничная частота усиления по току f_t составляет порядка 50 ГГц, поэтому на них можно реализовать СВЧ-устройства в диапазоне до 6–8 ГГц. Имеющиеся в библиотеке модели усилительных транзисторов до частоты 6 ГГц обеспечивают СКО S-параметров не более 30%. Для переключаемого nMOP-транзистора с общей шириной затвора 72 мкм потери в открытом состоянии составляют –1,4 дБ на частоте 5 ГГц, модель характеризуется СКО S-параметров не более 25% до частоты 10 ГГц.

Таким образом, результаты исследования показали, что отечественная 180 нм КМОП-технология вполне пригодна для изготовления СВЧ ИС с рабочими частотами до 6–8 ГГц. Однако для более точного проектирования на частотах выше 4 ГГц необходимо провести работы по уточнению моделей ряда элементов в библиотеке. Полученные СВЧ ИС МШУ и ЦАТТ обладают приемлемыми параметрами и могут быть использованы в составе различных радиотехнических систем.

Разработка ИС выполнялась в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор FEWM-2022-0006). Изготовление ИС осуществлено в ходе участия в прикладной научно-исследовательской работе «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW», выполняемой НИУ МИЭТ в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности».

Литература

1. Duan Z., Fang Y., Zhu H., Wu B., Wang Y., Dai Y., Gao H. A S-band switchless bi-directional transceiver with a 52% fractional bandwidth in CMOS technology // *Microelectronics Journal*, January 2024. Vol. 143. 106036.
2. Усачев Н. А., Елесин В. В., Сотсков Д. И., Назарова Г. Н., Никифоров А. Ю., Чуков Г. В., Метелкин И. О., Жидков Н. М., Дмитриев В. А., Шелепин Н. А., Селецкий А. В. Библиотека элементов и функциональные блоки для создания приемно-передающих БИС космического назначения по отечественной КМОП КНИ-технологии 180 нм // *Наноиндустрия*, 2017. Спецвыпуск (74). — С. 472–474.



УДК 621.375.4

Технологический процесс GaN на кремнии с топологической нормой 0,25 мкм в НИЦ «Курчатовский институт»

Занавескин М.Л.

*НИЦ «Курчатовский институт»**123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1**Zanaveskin_ml@nrcki.ru*

В докладе освещаются детали разработки технологии создания дискретных транзисторов и монокристаллических интегральных схем на гетероструктурах GaN на кремнии с топологической нормой 0,25 мкм. Технологический процесс основан на использовании подложек GaN на кремнии диаметром 100 мм отечественного производства. Приводятся результаты оптимизации конструкции гетероструктур и конструкции транзисторов. Показаны основные характеристики параметрических модулей разрабатываемой технологии в сравнении с процессами зарубежных фабрик.

Ключевые слова: GaN-on-Si; СВЧ монокристаллические интегральные схемы; СВЧ дискретные транзисторы; технология микроэлектронного производства.

Целью работы является создание на базе НИЦ «Курчатовский институт» производства по типу «foundry» по технологии GaN-on-Si с топологической нормой 0,25 мкм для обеспечения чипами отечественных разработчиков СВЧ модулей, используемых в задачах связи, радиолокации и радиоэлектронной борьбы. Используемый диаметр подложек составляет 100 мм. Используются подложки GaN на высокоомном кремнии отечественного производства с MoCVD эпитаксией (НТЦ микроэлектроники РАН).

В докладе представлена стадия разработки базового технологического процесса: оптимизация конструкции гетероструктуры и конструкции транзисторного элемента. Технологический процесс включает в себя возможность создания как активных, так и пассивных элементов монокристаллических интегральных схем (МИС). Приводятся основные этапы и возможности технологического процесса для проектировщиков.

Проводится сравнение технологического процесса по анализу параметрического монитора с зарубежными фабриками.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

УДК 621.38:621.3.049.77:621.382.049.77

Экспериментальные исследования параметров нормально-закрытого СВЧ GaN полевого транзистораЛосев В. В.¹ д. т. н., Хлыбов А. И.¹ к. т. н., Родионов Д. В.¹, Котляров Е. Ю.², Егоркин В. И.¹ к. т. н., Чаплыги Ю. А.¹ д. т. н.¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

alex1818@yandex.ru

² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

В работе приведены результаты экспериментальных исследований нормально-закрытых GaN НЕМТ-транзисторов, включающие измерения статических и динамических параметров. Показано, что максимальная частота усиления по току (f_T) составила не менее 30,0 ГГц, как в импульсном, так и в непрерывном режимах.

Ключевые слова: нитрид галлия; нормально-закрытый транзистор; НЕМТ; максимальная частота усиления; импульсный режим.

Сегодня использование полупроводников с широкой запрещенной зоной в различных областях техники становится все более актуальным. Благодаря своим превосходным свойствам нитрид галлия (GaN) и соединения на его основе (например $Al_xGa_{1-x}N$) являются перспективными полупроводниками для следующего поколения мощных и высокочастотных устройств. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе гетероструктур AlGaIn/GaN представляют собой устройства, принцип работы которых основан на наличии двумерного электронного газа (2DEG) [1]. При наличии 2DEG, действующего как канал проводимости, транзисторы находятся в нормально-открытом режиме, т.е. между электродами истока и стока будет протекать ток даже при нулевом напряжении между затвором и истоком. Однако во многих приложениях, в частности в силовой электронике, часто требуется нормально-закрытый режим, когда нет протекания тока при нулевом напряжении между затвором и истоком, а ток в канале модулируется приложением положительного смещения к электроду затвора. Это в свою очередь дает возможность при проектировании СВЧ-схем ограничиться одним источником питания [2]. Такие транзисторы называют нормально-закрытыми (НЗ НЕМТ).

Измерение параметров GaN НЕМТ транзистора в гигагерцевом диапазоне имеет важное значение для получения физического представления о его работе, а также для разработки малосигнальных моделей и моделей для большого сигнала.

В работе приведены результаты исследования параметров нормально-закрытых GaN НЕМТ-транзисторов, изготовленных на кремниевой подложке. Методика исследования включает проведение измерений статических и динамических параметров транзистора в непрерывном и импульсном режимах с длительностью импульса питания 3,0 мкс.

Максимальный ток стока открытого транзистора составляет ~600 мА/мм. Максимальная крутизна более 500 мА/В·мм при напряжении на затворе 0,6 В.

В процессе исследований определены зависимости входной емкости от режимов работы в гигагерцевом диапазоне и максимальные частоты работы транзистора.



Так максимальная частота усиления по току (f_T) составляет не менее 30,0 ГГц, как в импульсном, так и в непрерывном режимах.

По результатам исследований можно сделать заключение о возможности использования данных транзисторов для проектирования мощных ИМС для работы в X-диапазоне.

Литература

1. Asif Khan M., Kuznia J. N., Bhattarai A. R., Olson D. T. Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN // Appl. Phys. Lett., 1993. № 62. P. 1786–1787.
2. Егоркин В. И., Беспалов В. А., Зайцев А. А. и др. Нормально-закрытый транзистор с затвором р-типа на основе гетероструктур AlGaIn/GaN // Известия вузов. Электроника, 2020. — Т. 25. — № 5. — С. 391–401.

УДК 621.396.962.23

Исследование влияния фазовых шумов в смесителе, на основе математической модели

Богомолов Е. С., Медеев Д. А.*АО «Завод Протон»**124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8*

Проведено исследование влияния фазовых шумов в смесителе на основе математической модели в специализированном САПР.

Ключевые слова: фазовый шум; мощность гетеродина.

При проектировании радиолокационных систем, задачей которых является детектирование доплеровского сдвига частоты, часто требуется иметь дело со значениями скорости наблюдаемых объектов, соответствующими измерениям частот в килогерцевом диапазоне [1]. Основное влияние на отношение сигнал/шум на выходе приемника вносит фазовый шум синтезатора частоты. Оценка влияния фазового шума на этапе моделирования играет важную роль при проектировании доплеровских систем. В ходе исследования была изучена общая математическая модель поведения смесителя частоты [2].

В настоящей работе рассмотрены следующие вопросы:

- влияние уровня мощности, подаваемого на гетеродинный вход смесителя, на фазовый шум;
- расчет значения фазового шума на промежуточной частоте;
- выбор полосы для расчета фазового шума в приемнике.

За основной источник информации была выбрана техническая документация на САПР [2], в котором проводилось моделирование смесителя.

Считается, что рекомендуемое производителем значение мощности, подаваемое на вход гетеродина, вводит нелинейный элемент, расположенный внутри микросхемы, в компрессию, таким образом увеличение мощности на входе гетеродина не приводит к изменению фазового шума на промежуточной частоте. Уменьшение мощности приводит к уменьшению коэффициента преобразования.

Считается, что фазовый шум на промежуточной частоте переносится от гетеродина на радиочастотный вход смесителя как 1:1, умножается на коэффициент преобразования и отсчитывается от уровня сигнала на промежуточной частоте [3].

При расчете фазового шума значения в технической документации приводятся нормированные на 1 Гц. Следует интегрировать значение фазового шума в той полосе частот, которая берется непосредственно перед вычислительным устройством, обычно это значение соответствует полосе пропускания доплеровского фильтра на низкой частоте в приемнике.

Рассмотренные вопросы позволяют провести расчет отношения сигнал/шум на выходе приемника доплеровского измерителя скорости.

Литература

1. Медеев Д. А. Определение доплеровского смещения малоразмерных высокоскоростных объектов // Тезисы докладов 28-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика». Москва, Зеленоград, 29–30 апреля 2021 г. — С. 132.



2. Техническая документация на САПР Advanced Design System/ доступ к электронной версии книги доступен по ссылке: [Circuit Simulaton.pdf \(kazus.ru\)](#).
3. Henderson V. C. Predicting Intermodulation Suppression in Double-Balanced Mixers // The Communications Edge™.

УДК 623.482

Внедрение частичной автоматической системы сборки в технологический процесс производства приемо-передающих СВЧ-модулей

Коротаев Н. А., Быковский Г. В., Карасев М. С., Тутынин Д. В.*АО «НПП «Исток» им. Шокина»**141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а**info@istokmw.ru*

В работе представлено внедрение технологической линии автоматической посадки и разварки МИС СВЧ при производстве приемо-передающих модулей. Показаны современные образцы приемо-передающих модулей, изготавливаемых в АО «НПП «Исток» им. Шокина» с применением автоматической системы сборки.

Ключевые слова: приемо-передающий модуль; автоматической посадка МИС СВЧ; автоматическая разварка МИС СВЧ; автоматическая система сборки.

В состав современных радиолокационных систем (РЛС) входят подрешетки антенные. Основными элементами подрешеток антенных являются приемо-передающие модули (ППМ). С учетом ежегодной возрастающей потребности производства ППМ необходимо применять современное оборудование, позволяющее исключать технологические операции, выполняемые человеком. На территории АО «НПП «Исток» им. Шокина» налажена технологическая линия автоматической посадки и разварки монолитно-интегральных схем (МИС), являющихся основой СВЧ-трактов ППМ. Внедрение такой линии в технологический процесс производства ППМ позволило повысить качество выпускаемой продукции, повысить производительность труда, высвободить большое число рабочих и сократить объем выполняемого физического труда.

Технологическая линия включает в себя новейшее современное оборудование, позволяющее выполнять множество технологических операций, входящих в состав технологического маршрута производства ППМ, в автоматическом и полуавтоматическом режиме. В процессе внедрения такого высокотехнологичного оборудования был выявлен ряд проблем таких как обслуживание установок, разработка прецизионных оправок, подбор подходящих для автоматизированной сборки материалов, корректировка существующей конструкции изделий, создание группы автоматической сборки (обучение персонала), разработка и изготовление тары (специализированной тары для автоматической сборки), дефицит импортных расходных инструментов (замена части импортного инструмента на инструмент собственного производства). Данные проблемы в настоящее время успешно решены техническими специалистами АО «НПП «Исток» им. Шокина» и намечены пути для дальнейшего развития в области автоматизации производства.

Литература

1. Карасев М. С. Оперативный контроль электрических параметров приемо-передающих модулей X-диапазона частот // *Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника*, 2021. — Вып. 3 (550).
2. Карасев М. С., Далингер А. Г., Адиатулин А. В., Щёголев С. А. Система контроля выходной мощности приемо-передающего модуля X-диапазона частот // *Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*, г. Севастополь, 2021.



УДК 621.385.69

Технологии проектирования и производства корпусов, работающих в СВЧ-диапазоне

Шугаев Ш. Н., Егошин В. А., Ахметгалиев Р. Ш.

АО «Завод полупроводниковых приборов»

424003, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26

s.shugaev@mail.ru

В работе представлены результаты исследований диэлектрических свойств керамических подложек производства АО «Завод полупроводниковых приборов». Определены значения диэлектрической проницаемости и частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи, в интервале частот от 0 до 40 ГГц. По результатам проведенных исследований отмечается возможность применения данной керамики для создания совершенно новых, перспективных металлокерамических корпусов, рассчитанных для работы в СВЧ-диапазоне до 40 ГГц включительно.

Ключевые слова: металлокерамический корпус, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, высокотемпературная керамика, СВЧ-диапазон.

Широко известно, что материалы из высокотемпературной керамики находят широкое применение при создании корпусов для интегральных микросхем, а также для устройств СВЧ-диапазона. Они используются в качестве диэлектрической подложки для изготовления линий передач и элементов СВЧ-трактов, в качестве основы для изготовления антенн. Помимо этого, широкое применение керамика находит и при изготовлении металлокерамических корпусов для полупроводниковых интегральных схем, активно применяемых и эффективно работающих в СВЧ-диапазоне.

В настоящей работе приведены внешний вид и характеристики изделий, работающих в СВЧ -диапазоне

Для исследования диэлектрических свойств корпусов микросхем, использовался метод, основанный на измерении параметров линий передач. Приведены расчеты и результаты исследований по диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь керамических образцов производства АО «ЗПП» для частот до 40 ГГц.

Приведена сравнительная оценка полученных характеристик материала производства АО «ЗПП» и других известных производителей.

Появление возможности изготавливать на территории АО «Завод полупроводниковых приборов» СВЧ-корпуса для интегральных микросхем обусловлено, прежде всего, внедрением в стандартную технологию изготовления керамической массы нетривиальных методов и технологических подходов, позволивших модифицировать фазовый состав керамической массы по части оптимального соотношения кристаллической и стекловидной фазы. Вследствие положительных результатов проведенных исследований были значительно улучшены диэлектрические свойства керамических подложек. Приобретенный опыт, знания и правильное прогнозирование диэлектрических свойств в зависимости от фазового состава керамического материала и конструктивных особенностей изделий по результатам

математического моделирования, позволяют специалистам АО «ЗПП» проводить разработки СВЧ-корпусов, полностью соответствующих ТЗ, с первого раза.

Литература

1. Князев Н. С., Харитонов Ф. В., Малкин А. И. Исследование методов измерения электродинамических параметров диэлектрических материалов // Пояснительная записка от Уральского федерального университета ИРИТ-РтФ, кафедры ВЧСРТ. — Екатеринбург, 2015. — С. 7–8.
2. Savin A. A., Guba V. G., Ladur A. A., Bykova O. N. Method of printed circuits and semiconductor substrates material parameters extraction using wideband reflection measurements // Journal of Physics Conference Series, 2018. 1015 (2). DOI: 10.1088/1742-6596/1015/2/022018.
3. Terán-Bahena E. Y., Sejas-García S. C., Torres-Torres R. Characterization of Transmission Lines on PCB from S-Parameters by Determining the Dielectric and Conductor Losses at the Crossover Frequency // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018. Vol. 8. Iss. 5. DOI: 10.1109/TCP-MT.2018.2824321.
4. Marks R. B. A multilayer method of network analyzer calibration // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991. Vol. 39. Iss. 7. P. 1205–1215.
5. Savin A. A., Guba V. G., Ladur A. A., Bykova O. N. Method of printed circuits and semiconductor substrates material parameters extraction using wideband reflection measurements // Journal of Physics Conference Series, 2018. 1015 (2). DOI: 10.1088/1742-6596/1015/2/022018.
6. Terán-Bahena E. Y., Sejas-García S. C., Torres-Torres R. Characterization of Transmission Lines on PCB from S-Parameters by Determining the Dielectric and Conductor Losses at the Crossover Frequency // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018. Vol. 8. Iss. 5. DOI: 10.1109/TCP-MT.2018.2824321



УДК 621.314

Перспективы применения материалов ЛТСС в устройствах силовой электроники

Косевской В. А., Кваша М. Ю., Ештокина А. И.

АО НПП «СпецЭлектронСистемы»

125319, г. Москва, а/я 59, Волгоградский просп., 42, корп. 5

kosevskoy@npc-ses.ru, kvasha@npc-ses.ru, eshtokina@npc-ses.ru

В докладе обсуждается возможность применения материалов ЛТСС в устройствах силовой электроники, ключевые преимущества указанных материалов в конструктивно-технологических решениях для приборов силовой электроники и примеры практической реализации электроники данного класса.

Ключевые слова: силовая электроника; ЛТСС (низкотемпературная совместно обжигаемая керамика); многослойный керамический модуль; полупроводниковый кристалл; силовые шины.

Современные устройства силовой электроники (такие, как изделия распределения, трансформации и преобразования энергии, вторичные источники электропитания, инверторы и пр.), как правило, состоят из электронных узлов на базе плат со встроенным набором радиокомпонентов (резисторов, конденсаторов, полупроводниковых диодов, транзисторов и микросхем). Указанные компоненты соединяются в электронную схему, осуществляющую указанные выше функции управления и преобразования электрической электроэнергии. Несущей основой для установки и соединения электронных компонентов (в том числе мощных полупроводниковых диодов и транзисторов) являются электронные платы на основе различных видов фольгированных ламинатов на основе органики, либо керамики (DBC) с напыленными слоями меди или же фольгированной алюминиевой основы с нанесенными слоями меди с диэлектрическими разделительными слоями.

В настоящее время в открытой печати появились публикации со ссылками и описаниями экспериментальных работ по созданию силовых модулей на основе многослойной керамики низкотемпературного обжига (ЛТСС) [1–4]. Использование керамики низкотемпературного обжига позволяет обеспечить:

- более высокую электрическую надежность изделия за счет использования материала с более высокими электрическими характеристиками;
- высокую пыле- и влагозащищенность;
- более высокую радиационную стойкость несущей основы силового модуля;
- повысить степень интеграции компонентов за счет использования объемной структуры электрических соединений силового модуля;
- значительно снизить уровень паразитных шумов в выходных сигналах и излучаемых радиочастотных помех силового модуля за счет уменьшения длины межсоединений;
- понизить уровень выбросов, вызывающих выход из строя мощных полупроводниковых ключей при переключениях (в частности, высоковольтных MOSFET транзисторов) до приемлемого уровня за счет минимизации паразитных индуктивностей в силовых шинах и соединениях кристаллов с платой.

Вопросы использования керамики ЛТСС освещены в публикациях ряда зарубежных исследователей. Так, в работе [1] приведен расчет и экспериментальное

исследование силового модуля, использующего интерпозер, изготовленный на базе многослойной керамики LTCC. Модуль показал хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных и возможность применения керамики LTCC для производства изделий данного класса. Работа [2] дает представление об экспериментальном исследовании силового модуля с использованием материалов LTCC в части формирования силовых шин для снижения паразитных индуктивностей. Измерение параметров экспериментального образца модуля методом двухимпульсного теста показало существенное улучшение параметров переключения и повышения надежности за счет применения LTCC. В работе [3] представлен модуль вторичного электропитания на основе электронной платы, спроектированной и изготовленной с использованием технологии и материалов LTCC. Модуль показал хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. В работах [4] приведены результаты работ по использованию керамики LTCC для создания плоских трансформаторов на основе технологии многослойной печати. Приведенные примеры трансформаторов, используемых для различных применений, позволяют судить о высокой надежности, высокой повторяемости параметров и приемлемой для массового рынка стоимости таких изделий.

В АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы» на основе имеющейся в распоряжении производственной линейки и доступных материалов как отечественных, так и зарубежных производителей систем LTCC были разработаны и изготовлены некоторые виды изделий силовой электроники:

- радиационно стойкий источник вторичного электропитания с малым уровнем паразитных шумов;
- номенклатура индуктивных элементов (силовые и сигнальные трансформаторы, дроссели и пр.) с высокой степенью электронадежности и повторяемости параметров;
- макеты силовых модулей типа «полумост» для создания инверторных систем управления приводными устройствами.

Проведенное изучение опыта зарубежных инженерных компаний и опыт разработки и исследования изделий на основе LTCC керамики в АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы» позволяют утверждать, что системы указанных керамических материалов обеспечат в ближайшем будущем существенное улучшение параметров и повышение надежности изделий и компонентов силовой экономики.

Литература

1. A Double-Sided Stack Low-Inductance Wire-Bondless SiC Power Module with a Ceramic Interposer. Autor Atanu Dutta. University of Arkansas Fayetteville, ScholarWorks@UARK. Graduate theses and dissertations, 12. 2021. URL: <https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5800&context=etd>.
2. Metallization, Material Selection, and Bonding of Interconnections for Novel LTCC and HTCC Power Modules. Aleksander Sešek and Kostja Makarovič. Materials 2022, 15, 1036. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15031036>.
3. Dong Yun Jung, Minki Kim, Junbo Park, Chi-Hoon Jun, Jong Moon Park, Sang Choon Ko. Efficiency improvement of a DC/DC converter using LTCC substrate // ETRI Journal, 2019. Vol. 41. Iss. 6. P. 811–819. URL: <https://doi.org/10.4218/etrij.2018-0551>.
4. High Frequency LTCC based Planar Transformer. Adithya Venkatanarayanan. University of Arkansas, Fayetteville. 12, 2019. URL: <https://scholarworks.uark.edu/etd/3518>.



УДК 621.316

Обзор технических решений, используемых в конструкции мощных ВЧ и СВЧ фиксированных аттенуаторов

Малышев И. Н., к. т. н., Белков И. Г., к. т. н., Еремеев Ю. В.

АО «Научно-производственное объединение «ЭРКОН»

607510, г. Сергач, ул. Казакова, 3, офис 305

info@erkon-nn.com

Рассмотрены основные технические решения, применяемые при проектировании и производстве коаксиальных ВЧ и СВЧ фиксированных аттенуаторов (резистивных поглотителей) ПР1-25. Показаны особенности расчета схем и топологий диссипативных элементов. Приведены характеристики разработанных резистивных поглотителей.

Ключевые слова: фиксированный коаксиальный аттенуатор; пленочные резисторы; мощный СВЧ поглотитель.

Мощные резистивные поглотители с воздушным охлаждением находят широкое применение в различных радиоэлектронных средствах (РЭС) — от лабораторного использования при регулировке аппаратуры до стационарных телекоммуникационных систем связи и передвижных бортовых систем в навигации и радиолокации. Важными особенностями при их проектировании являются расчет и оптимизация схем и топологий диссипативных элементов, учет особенностей сложного технологического процесса формирования резистивной пленки, а также проработка конструкции изделий с элементами механической и термомеханической развязок.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели разработанных резистивных поглотителей:

- номинальная входная средняя мощность — 50–2000 Вт;
- номинальная входная импульсная мощность — 500–10000 Вт;
- номинальное ослабление — 3–60 дБ;
- допустимое отклонение ослабления — $\pm(0,3-2,5)$ дБ;
- рабочий диапазон частот — 0–18 ГГц;
- максимальный КСВН на входе — 1,2–1,45;

В качестве линии передачи выбрана подвешенная полосковая линия. Преимущество ее состоит в том, чтобы минимизировать диэлектрические потери за счет распространения волны через воздух. Такая полосковая линия используется в средних микроволновых частотах, где она превосходит микрополосковую по потерям, но не такая громоздкая или дорогая, как волновод.

В качестве диссипативных элементов использованы планарные пленочные резисторы на диэлектрической подложке с большой теплопроводностью, что позволяет существенно увеличить рассеиваемую мощность.

Для решения вопроса термомеханической развязки проработана общая конструкция аттенуатора: корпус-радиатор с коаксиальными соединителями на входе и выходе и цепочкой планарных пленочных резисторов на керамических платах с каскадным соединением между собой гибкими перемычками и механически закрепленными во внутреннем канале корпуса-радиатора через пружинные контакты, обеспечивающие как электрический, так и тепловой контакт.



Для решения проблем широкополосного согласования и рассеяния мощности использованы многоэлементные структуры, где каждый резистивный элемент рассеивает небольшую мощность и имеет малые паразитные параметры, что обуславливает расширение полосы рабочих частот.

УДК 621.375.4

ММО радиочастотная GaN/GaAs микросборка приемо-передающего устройства активного антенного модуля высотной платформы для сетей 5G advanced NTN

Саури А. Д., Клоков В. А., Сарайкин А. И., д. т. н., Каргин Н. И.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
ADSauri@mephi.ru

В данной работе показана модель микросборки приемо-передающего устройства активного антенного модуля, обеспечивающего канал связи «терминал-базовая станция», при размещении БС на БПЛА или высотной платформе. Модель поддерживает технологию ММО 2×2 и демонстрирует работу в диапазоне FR-1 с возможностью покрытия зоны до 20 км.

Ключевые слова: сеть 5G NTN; NAPS; ММО; усилитель СВЧ-сигналов; МИС.

Начиная с 16-го релиза 3GPP осуществляет исследование и разработку стандартов для развертывания сети 5-го поколения в воздушном пространстве, как на спутниках различной высоты, так и беспилотных летательных аппаратах. Построение сети связи в воздушном пространстве позволяет покрывать большую площадь, осуществлять коммуникацию с труднодоступными регионами, а также оперативно развертывать доверенную сеть при чрезвычайных ситуациях и катаклизмах.

Схема организуемого канала связи показана на рис. 1, отражены основные расстояния, а также угол определяющий диаграмму направленности антенны.



Рис. 1. Схема организуемого канала связи

Как видно из схемы, высота подъема станции составляет 8 км, а длина трассы до наземного терминала $L = 17$ км. При этом формируется зона покрытия с диаметром $2R = 30$ км, для обеспечения которой необходима антенна с шириной основного лепестка 120° .

Поскольку в качестве абонентского терминала будет выступать мобильный телефон, то рабочая частотная полоса определяется поддерживаемыми стандартами. Таким образом, канал построен в полосе $n7$ 2600 МГц в режиме FDD, так как он имеет наивысшую частоту 4/5G совместимого диапазона и не требователен к компонентной базе.

На основе математической модели была проведена оценка параметров приемо-передатчика. Модель включает в себя уравнение прямой видимости, затухание э/м

волн в пространстве, коэффициенты усиления антенн и различного рода потери. Основные параметры приемо-передатчика сведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры приемо-передатчика

Параметр	Значение
Мощность передатчика, $P_{\text{ПРД}}$, Вт/дБм	5/37
SNR, дБ	10
Ширина канала, BW, МГц	20
$K_{\text{УАНТ ПРМ}}$, дБи	10
$K_{\text{УАНТ ПРД}}$, дБи	2
Потери в трактах ПРД и ПРМ, дБ	2 + 2
Ослабление в свободном пространстве, дБ	~130

Так же отмечено, что при увеличении высоты платформы до 10 км необходимо либо увеличение выходной мощности передатчиков, либо снижение ширины канала при сохранении прочих параметров.

Для решения поставленной задачи предложена микросборка приемо-передающего устройства, структурная схема которого показана на рис. 2.

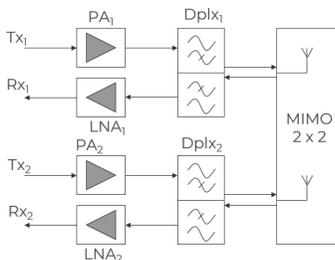


Рис. 2. Структурная Схема приемо-передающего устройства

Устройство представляет собой набор МИС и ГИС усилителей, размещенных в едином корпусе и разделенных экранирующими перегородками, и состоит:

- PA — усилители мощности, построенные по гибридной технологии ИС на основе бескорпусных GaN-транзисторов производства Cree/Macom, обеспечивающие выходную пиковую мощность не менее 40 Вт, для работы с высокими значениями пик-фактора;
- LNA — маломощные усилители, обладающие $K_{\text{У}}$ не менее 20 дБ, выполненные по технологии МИС на собственном техпроцессе НИЯУ МИФИ 0,15 мкм GaAs;
- Dplx — дуплексеры, обеспечивают частотное разделение сигналов Up-/Downlink. При замене данных компонентов на антенные коммутаторы возможна работа модуля в режиме TDD на n38 2570–2620 МГц;



- Антенная система с шириной основного лепестка $60^\circ/120^\circ$ и поддержкой технологии ММО для увеличения пропускной способности канала.

В рамках настоящей работы показана модель микросборки приемо-передающего устройства для работы в составе активного антенного блока базовой станции, расположенной на борту высотной платформы. Модуль обеспечивает каналом связи базовую станцию и абонентский терминал, расположенный на расстоянии не менее 17 км и суммарную зону покрытия диаметром не менее 30 км в диапазоне п7 2600 МГц.

Литература

1. Lou Z., Belmekki B. E. Y., Alouini M. S. HAPS in the non-terrestrial network nexus: Prospective architectures and performance insights // IEEE Wireless Communications, 2023. Vol. 30. №6. P. 52–58.
2. Kaneko T., Shiikuma K., Kunihiro K. GaN HEMT high efficiency power amplifiers for 4G/5G mobile communication base stations // 2014 Asia-Pacific Microwave Conference // IEEE, 2014. P. 994–997.
3. Staudinger J. et al. Wide bandwidth GSM/WCDMA/LTE base station LNA with ultra-low sub 0.5 dB noise figure // 2012 IEEE Radio and Wireless Symposium. IEEE, 2012. P. 223–226.
4. Цунваза Д. и др. Разработка нелинейной модели псевдоморфного 0,15 мкм рHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs-транзистора // Микроэлектроника, 2023. — Т. 52. — №3. — С. 200–206.

УДК: 621.396.67.012.12

Применение композитных материалов в СВЧ приложениях на примере антенн для систем 5G и 6G

Ерзунов П. Н.

АО «Завод ПРОТОН»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8

Развитие систем мобильной связи 5G и 6G требует создания антенн с улучшенными характеристиками. Традиционные материалы, такие как металлы и диэлектрики, не справляются с этой задачей. Композитные материалы представляют собой альтернативу, позволяющую создавать антенны с меньшим весом, высокой прочностью, гибкостью и низкими потерями в СВЧ-диапазоне. Рассматривается применение композитных материалов для создания антенн, в том числе технологии их изготовления и перспективы развития.

Ключевые слова: композитные материалы; СВЧ приложения; антенны; системы 5G; системы 6G; микроэлектроника.

Современные системы мобильной связи 5G и 6G предъявляют к антеннам высокие требования, которые не всегда удовлетворяются традиционными материалами. Металлы и диэлектрики, используемые в антеннах, ограничиваются высокой стоимостью, большим весом, сложностью обработки и ограниченными возможностями интеграции. [1]

В этом контексте композитные материалы представляют собой перспективное решение, предлагая преимущества в области снижения веса, повышения прочности, гибкости и уменьшения потерь в СВЧ-диапазоне [2]. Композиты, состоящие из матрицы и наполнителя, обладают свойствами, которые позволяют создавать антенны с конформной формой, интегрировать их в различные поверхности и оптимизировать их характеристики. Низкий тангенс угла потерь у композитов повышает эффективность антенн, а возможность интеграции электронных компонентов непосредственно в их структуру упрощает дизайн, сборку и производство.

Перспективным направлением развития является разработка новых материалов с улучшенными свойствами, таких как полимеры с низкими потерями, армированные наполнители, метаматериалы и материалы с низким коэффициентом теплового расширения. Особый интерес представляет применение многослойных композитов, позволяющих объединить материалы с различными свойствами. Технологии 3D печати открывают новые возможности для создания антенн с произвольными геометрическими формами, оптимизации их характеристик и создания индивидуальных решений.

В этой статье рассматривается патч антенна из метаматериала (CSRR). Эта антенна выполнена на диэлектрической подложке FR4 с относительной диэлектрической проницаемостью 4,3, толщиной подложки 1,6 мм и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,02. Моделирование выполнено в системе автоматизированного проектирования (САПР) CST Studio Suite. Представлены различные конфигурации антенн и их диаграммы направленности.

*Литература*

1. Lee Cheng-Jung, Huang Wei, Gummalla Ajay, Achour Maha. Small Antennas Based on CRLH Structures: Concept, Design, and Applications // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2011. № 53. P. 10–25. 10.1109/MAP.2011.5949321.
2. Стаценко Л. Г., Смирнова М. М., Север Д. С., Дронин Я. С. Применение метаматериалов в антенных устройствах цифровых систем связи // *Журнал радиоэлектроники*, 2024. — № 1. — URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.2>.

УДК 621.382.3

Применение синергетических подходов в методах проектирования мощных AlGaIn/GaN HEMT с заданными приборными характеристиками

Торхов Н. А.¹, Шутов Д. Г.¹, Колковский Ю. В.^{1,2}, Жабина Е. Ю.¹¹ АО «НПП «Пульсар»

105187, г. Москва, Окружной проезд, 27

administrator@pulsarnpp.ru

² МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

rector@mirea.ru

Использование синергетических подходов в методах приборно-технологического проектирования позволяет более эффективно учитывать пространственную геометрию гетероэпитаксиальной структуры при оптимизации топологии мощных AlGaIn/GaN HEMT в целях достижения заданных приборных характеристик.

Ключевые слова: GaN; HEMT; СВЧ; размерные эффекты.

Хорошо известно, что морфология гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) AlGaIn/GaN оказывает значительное влияние на СВЧ-характеристики, изготовленных на их основе HEMT [1–3]. В частности, это проявляется в нелинейной зависимости параметров нелинейных компактных моделей мощных AlGaIn/GaN HEMT от полной ширины канала. Данное обстоятельство приводит к невозможности использования простого линейного преобразования конструктивных размеров HEMT (например длины l и ширина d канала, количества секций n) для достижения требуемых характеристик.

Производимые на сегодняшний момент AlGaIn/GaN ГЭС могут иметь достаточно высокие сравнимые, или даже превышающие размеры основных конструктивных элементов HEMT (например l , d и n) латеральные неоднородности, которые в плоскости пластины могут достигать нескольких миллиметров. При этом вертикальные размеры таких неоднородностей соизмеримы, или даже могут превышать суммарную толщину гетероэпитаксиальных слоев — десятки нанометров. В связи с этим, синергетические особенности таких ГЭС могут проявляться в том, что их развитая геометрия приводит к усилению негативного комплексного воздействия на аддитивные электрофизические и приборные характеристики AlGaIn/GaN HEMT: коэффициент усиления по мощности K_u , выходной мощности P_{out} , коэффициент шума $K_{ш}$, КПД, PAE, параметры рабочих точек по току и напряжению.

Исследовав основные геометрические свойства таких ГЭС, мы научились использовать их синергетические особенности при разработке топологии мощных AlGaIn/GaN HEMT с заданными приборными характеристиками. Например, используя полученный опыт и применив современные аналитические методы реверс-инжиниринга к импортным AlGaIn/GaN ГЭС с плотностью дислокаций на уровне 10^4 см^{-2} (например Suzhou Nanowin Science and Technology Co., Ltd; Cree, Inc.) и промышленным GaN HEMT CGH60030D ($l = 5,5 \text{ мкм}$, $d = 350 \text{ мкм}$, $n = 20$)



и CGHV1J006D ($l = 5,5$ мкм, $d = 190$ мкм, $n = 6$) было получено, что заявленные параметры по K_y , P_m , K_w , PAE и КПД данных транзисторов соответствуют ГЭС с Хаусдорфовой размерностью $D_H \approx 1,85$ и локальной однородностью $L \equiv I_{SRC} \approx 1$ мкм (SRC — smooth-rough crossover scale — масштаб, выше которого фрактальные размерности примерно равны евклидовым, ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 (заменен на DIN EN ISO 25178-71:2018-01)). При этом оказалось, что наиболее критичным по сравнению с D_H является параметр I_{SRC} увеличение которого, например, до 1,5 мкм (ухудшение латеральной однородности) в данном случае приводит к ухудшению параметров транзисторов той же конструкции более чем на 30%, а уменьшение I_{SRC} до 0,5 мкм (улучшение однородности) — к их улучшению более чем на 90%. Таким образом, можно сделать вывод, что $L \equiv I_{SRC}$ является одним из важных параметров ГЭС, определяющих качество изготавливаемых на их основе GaN HEMT.

Литература

1. Torkhov N.A., Babak L.I., Kokolov A.A. The Influence of AlGaIn/GaN Heteroepitaxial Structure Fractal Geometry on Size Effects in Microwave Characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs // Symmetry, 2019. Vol. 11. № 12. P. 1495. DOI: 10.3390/sym11121495.
2. Torkhov N.A., Evstigneev M.P., Babak L.I., Kokolov A.A. The Fractal Geometry of TiAlNiAu Thin Film Metal System and Its Sheet Resistance (Lateral Size Effect) // Symmetry, 2021. Vol. 13. P. 2391. DOI: 10.3390/sym13122391.
3. Torkhov N.A., Babak L.I., Budnyaev V.A., Kareva K.V., Novikov V.A. Conversion of the anomalous skin effect to the normal one in thin-film metallic microwave systems // Physica Scripta, 2022. Vol. 97. № 9. P. 095809. DOI: 10.1088/1402-4896/ac837d.

УДК 539.216.2

Апробация аспектов технологических операций формирования омических контактов к подложкам монокристаллического алмаза**Иванова Н. Е., Щаврук Н. В., Галиев Р. Р., Гнатюк Д. Л.***Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой микроэлектроники имени В. Г. Мокерова РАН**117105, г. Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5**natalia.ivanova.mipt@gmail.com*

Появление подложек монокристаллического алмаза вызывает особый интерес в сфере приложений для микроэлектроники. Внедрение данного материала необходимо начинать с разработки базовых технологических процессов. Одним из базовых технологических процессов изготовления МИС — изготовление омических контактов. В работе представлены результаты апробации технологических процессов формирования вжигаемых контактов. Результаты исследования морфологии поверхности подложки монокристаллического алмаза, влияние плазмохимической обработки, глубина диффузии вожденного контакта в подложку монокристаллического алмаза.

Ключевые слова: монокристаллический алмаз; характеристика морфологии поверхности; формирование вжигаемых контактов; плазмохимическое травление.

Монокристаллический алмаз является одним из перспективных материалов для изготовления МИС за счет своих уникальных характеристик. Компанией ООО «Фрезарт-СВД» изготовлены подложки монокристаллического алмаза линейными размерами 9×9 мм.

ИСВЧПЭ РАН проведены исследования морфологии поверхности подложек монокристаллического алмаза. Методом дифрактометрии было подтверждено, что подложка алмаза монокристаллическа. С помощью метода оптической профилометрии исследована шероховатость поверхности подложек алмаза, которая составила R_z не более 14 нм, при этом R_a = не более 2,7 нм на длине 280 нм. Данные измерения подтверждены измерениями на атомно-силовом микроскопе.

Для формирования тестовых элементов на подложке монокристаллического алмаза применен метод электронно-лучевой литографии. Выбрана композиция металлов $Ti/Ni/Au = 30/100/500$ нм напыленная методом термического напыления. Далее проводилась операция вжигания 30 мин. при температуре 850 °С.

Проведены измерения сопротивления изготовленных тестовых элементов контактов и оценка глубины вожденного слоя методом вторичной ионной масс-спектрологии.

Для оценки влияния нарушенного слоя на сопротивление контакта сформированного на подложке монокристаллического алмаза проведено плазмо-химическое травление на глубину не менее 70 нм. Глубина травления контролировалась по времени.

Далее были повторно изготовлены тестовые элементы вжигаемых контактов с предварительной плазмо-химической обработкой поверхности подложки алмаза. Для оценки влияния плазмо-химической обработки на поверхность подложки проведены исследования морфологии.

Работа выполняется в рамках НИР по заказу ООО «Фрезарт-СВД».



УДК 621.3

Проектирование и оптимизация многокристального силового GaN микромодуля

Доценко В. В.

АО «НПП «Радар ммс»

197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, 37, лит. А

В работе представлены результаты разработки силовой GaN микросборки на основе AlN DBC керамики со сквозными металлизированными отверстиями, характеризующейся пониженными величинами индуктивностей затворного и силового контуров GaN-транзисторов, а также теплового сопротивления микросборки. Микросборка предназначена для применения в составе высокоплотных маломощных импульсных DC-DC преобразователей, работающих на частотах более 0,5 МГц. Микросборка включала в себя два кристалла силовых нормально-закрытых GaN-транзисторов с высокой подвижностью электронов, корпусированный Si драйвер, AlN керамическую DBC подложку и SMD пассивные компоненты. Силовая GaN микросборка размером 10,5×9 мм имела два независимых канала, каждый из которых обеспечивал ток до 7 А, рабочее напряжение не менее 100 В. Конструктивное решение керамической платы AlN DBC было проверено с помощью анализа в программной среде Ansys. Показано, что для данной конструкции микросборки индуктивность затворного контура имела характерную величину около 1,1 нГн, с расогласованием менее 4% между каналами, а суммарная индуктивность силового контура транзистора не превышала 0,5 нГн.

УДК 621.3

Разработка тепловых прецизионных преобразователей мощности СВЧ-диапазона

Матвеев А. И., Чирков И. П.

ФГУП «ВНИИФТРИ»

141570, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)

в данной работе проведен анализ метрологических задач, решаемых при разработке высокоточных СВЧ ваттметров. Определены основные недостатки тепловых преобразователей мощности, предложены и опробованы методы уменьшения их влияния на погрешности средств измерений.

Ключевые слова: ваттметр поглощаемой мощности; измеритель мощности СВЧ; преобразователь мощности СВЧ.

Мощность электромагнитных колебаний является основным параметром, характеризующим интенсивность электромагнитного излучения на сверхвысоких частотах. С учетом многомиллионной стоимости ошибок вследствие недостоверности контроля энергетических параметров приемо-передающих модулей и систем на этапах их разработки и производства обеспечение единства измерений мощности СВЧ становится насущной задачей, сопровождаемой, зачастую, ужесточением требований к точности измерений

При разработке, испытаниях и настройке радиотехнических устройств и систем применяют большой парк средств измерений, имеющих нормируемые характеристики, выраженные в единицах мощности или отношении мощностей: ваттметры, генераторы сигналов, анализаторы спектра, сигналов, цепей. В статье представлены результаты исследований и разработок ФГУП «ВНИИФТРИ» по данной теме в том числе для решения задач импортозамещения.

Точные измерения мощности ВЧ и СВЧ колебаний выполняют ваттметрами в диапазоне частот от 30 МГц до 178 ГГц с разделением на поддиапазоны частот применяемых линий передачи. В диапазоне частот до 20 ГГц применяется в основном коаксиальные ваттметры, а на частотах выше — волноводные.

Термистор. ФГУП «ВНИИФТРИ» разработаны чувствительные к мощности СВЧ колебаний элементы в виде термисторов на основе оксидов переходных металлов, у которых не полностью заполнена 3D-электронная оболочка, из-за чего обмен электронами между соседними ионами затрудняется, и электропроводность вещества становится малой. Если температура увеличивается, то электроны приобретают дополнительную тепловую энергию, процесс обмена электронами становится интенсивнее и поэтому резко увеличивается подвижность носителей заряда и снижается сопротивление. Оксидные терморезисторы имеют малые габариты, а значит, малую тепловую инерцию.

Болометр. Выполнено электромагнитное моделирование вариантов изготовления серийных преобразователей мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Изготовлены болометрические преобразователи на основе монокристаллического кремния с низкоомными контактами. Уменьшить влияние контактов удалось при уменьшении геометрических размеров волноводов в диапазоне частот 110–170 ГГц за счет оригинальной конструкции болометра с увеличенной площадью контактных площадок.



Термопара косвенного подогрева. Перспективной в настоящее время является разработка коаксиальных ваттметров на основе МЭМС. В настоящее время разработана конструкция макета преобразователя на основе копланарной линии передачи, совмещающей СВЧ-нагрузку и МЭМС-преобразователь в едином кристалле с диапазоном рабочих частот от 0 Гц до сотен ГГц.

Моделирование тепловых процессов показало, что при толщине мембраны 10 мкм тепловое равновесие (разность между горячим и холодным спаем термопары) устанавливается через 50 мкс, при этом продолжительный нагрев увеличивает температуру чипа в целом. При выделении 100 мВт мощности в СВЧ резисторе ожидаемая разность температур составляет 12 °С. В конструкции кристалла предусмотрена симметричная схема СВЧ поглотителей и термопар. При этом к СВЧ разъему подключается только одна СВЧ-нагрузка, а вторая служит для реализации опорного канала.

Датчик температуры мембраны, детектирующий нагрев СВЧ резисторов, должен иметь высокую разрешающую способность в диапазоне рабочих температур. Наиболее подходящими являются термопары. При этом КМОП-технологии позволяют производить поликремневые термопары, обладающие значением коэффициента Зеенбека на порядок большим чем у термопар на основе пар металлов.

Формируется единая система метрологической прослеживаемости измерений мощности электромагнитных колебаний и парк отечественных средств измерений мощности в коаксиальных и волноводных трактах в диапазоне частот от 10 МГц до 178,4 ГГц.

Литература

1. Коудельный А. В., Малай И. М., Матвеев А. И., Перепелкин В. А., Чирков И. П. Разработка комплекса аппаратуры для измерения мощности электромагнитных колебаний высшей точности в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц // Альманах современной метрологии, 2021. — № 2 (26). — С. 25–36.

УДК 621.396.9

Результаты натурной отработки моделирования схемотехники твердотельного ППМ РСА методом пространственно-временной обработки сигнала в сквозном канале

Кавецер Е. В.¹, Каргашин Ю. Д.², Лемперт П. И.¹, Лычагин А. Ю.¹¹ АО «НПП «Пульсар»

105187, г. Москва, Окружной проезд, 27

ev_kaevitser@pulsarnpp.ru, pi_lemper@pulsarnpp.ru, v9175835086@gmail.com

² АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

Работа посвящена результатам натурной отработки схемотехнического решения приемо-передающего модуля космического базирования Х-диапазона, обоснованию выбора схемы возбуждения на основе оценки импульсного отклика РСА с подтверждением результатов натурными испытаниями.

Ключевые слова: схемотехника твердотельного ППМ РСА; разрешение по дальности; определение разрешения субапертурной АФАР; сквозной тракт АФАР.

Введение

В настоящее время возрастает потребность в разработке технологии испытаний и отработки твердотельных систем дистанционного зондирования Земли (далее — ДЗЗ), в частности радары с синтезированной апертурой (далее — РСА) космического базирования, вследствие возможности применения данного средства вне зависимости от погодных условий и возможности достижения субметрового (менее 1 метра) разрешения на местности после обработки результатов радиолокационной съемки.

При создании РСА (наземного и космического применения) и последующих испытаниях типовая программа расчета и испытаний не дает коррелирующих результатов, что требует перехода к новым методам и подходам, а именно к декомпозиции комплекса на отдельное создание схемотехники диаграммообразования приемо-передающих модулей и излучающего полотна [1, 2]. В ходе проведения комплексных испытаний [3] измерение целевых параметров показали нарушение расчетных моделей комплексной оценки характеристик системы (определение разрешения на местности как характеристики спектра сложного сигнала $R \sim c/2^2 \Delta f_{\text{зонд}}$).

Расчетная модель с применением аппаратной функции исторически пришла от систем с зеркальной апертурой с механическим приводом вращения луча. При использовании сигнала в комплексе с синтезом апертуры (система с электронным сканированием луча) и широкополосным с внутримпульсной модуляцией (линейным частотно-модулированным сигналом, далее — ЛЧМ) сигналом проявляются особенности прохождения зондирующего импульса через систему распределения сигнала, систему формирования фазового фронта и само формирование фазового фронта вне антенного полотна. Проведенные теоретические и практические исследования показали необходимость рассмотрения новых методов для создания и оценки характеристик систем диаграммообразования в части



космических средств, поскольку системы с синтезом апертуры космического базирования являются антеннами большой электрической длины вдоль оси движения.

Основная часть

При создании средств дистанционного зондирования земли на твердотельных приборах с широкополосным сигналом одним из основных направлений остается вопрос комплексной оценки соответствия целевого параметра как на этапе эскизного проектирования, так при сборке, наладке и предъявительских испытаниях. Существующий подход- декомпозиция целевых требований к системе на отдельные характеристики блоков, без учета пространственно- временной характеристики формирования луча с РСА большой электрической длины (более 10λ) не позволяет оценить радиометрическую характеристику локатора в целом и данная работа производится уже на этапе калибровки всего КС.

При данном подходе учитывался динамический сигнал возбуждения, направление нормали АФАР (может не совпадает с геометрической нормалью полотна. На представленных диаграммах видно влияние схемы диаграммообразования РСА субметрового разрешения построенной на фазовращателях и линиях задержки (срезание ширины спектра по краям), что приводит к снижению разрешения по дальности.

Разработанная модель на основе согласованного фильтра пространственно-временной обработки сигнала позволяет смоделировать характеристики для всего излучающего полотна в комплексе и его составных частей, рассмотреть влияние схемотехники твердотельного РСА и подтвердить разрешение субапертурной системы дистанционного зондирования Земли в части расчета и оптимизации создания опытных образцов. На этапе натурных испытаний возможность учета влияния схемотехники позволяет цифровым накоплением проводить обнаружение и селекцию подвижных малоразмерных целей.

Литература

1. Бабокин М. И., Савостьянов В. Ю. Применение частотно-манипулированных сигналов для повышения широкополосности РЛС с АФАР // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». — Муром, 2020.
2. Проблемы антенной техники под ред Воскресенского. — М.: Радио и связь, 1989.
3. Чиков В. А., Волченков А. С., Петров А. С., Прилуцкий А. А. Компьютерная программа для моделирования характеристик субапертурных АФАР, используемых в космических радиолокаторах с синтезированной апертурой // Вестник «НПО имени С. А. Лавочкина», 2020. — 1/47.

УДК 621.3

Оптический смеситель СВЧ-диапазона на основе низкотемпературного GaAs

Дудкин П. В.¹, Криштоп В. Г.^{1,2}, Соболев А. С.¹, Андреев С. Н.¹,
Пonomарев Д. С.³, Лаврухин Д. В.³, Галиев Р. Р.³, Ячменев А. Э.³

¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

² Институт проблем технологии микроэлектроники РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

³ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой микроэлектроники
имени В. Г. Мокерова РАН

117105, г. Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5

Разработан оптический полупроводниковый смеситель без шунтирующей емкости для диапазона от 30 до 38 ГГц и от 60 до 70 ГГц. Оптический полупроводниковый смеситель обеспечивает управляемую перестраиваемую СВЧ-генерацию в диапазоне от 1 до 30 ГГц. Оптический смеситель может применяться в радиофотонных РЛС.

Ключевые слова: радиофотоника; радиолокация; оптоэлектронный преобразователь; оптический полупроводниковый смеситель.

Разработан оптоэлектронный преобразователь, изготовлены чипы оптоэлектронного преобразователя. Оптоэлектронный преобразователь представляет собой фотопроводящий слой GaAs, с нанесенной на нем структурой золотых наноконтактов с развитой геометрией, и с просветляющим покрытием — слоем нитрида кремния. Изготовлены оптические смесители с нанозэлектродами двух типов: встречно-штыревые и плазмонные гребенки.

Разработан оптический смеситель для генератора гетеродина, изготовлен и собран макет оптического смесителя с согласующими структурами в двух вариантах исполнения: на базе планарной линии передачи для диапазона 30–40 ГГц; с квазиоптической интегральной линзовой антенной для диапазона 60–70 ГГц.

Оптический полупроводниковый смеситель обеспечивает управляемую перестраиваемую СВЧ-генерацию в диапазоне от 1 до 30 ГГц с планарной линией передачи, и в диапазоне от 40 до 80 ГГц с интегральной линзовой антенной.

Исследованы рабочие параметры оптического смесителя, проведено тестирование устройства с использованием двухволнового источника оптического излучения с длиной волны 840 нм. Оптический смеситель может применяться в радиофотонных РЛС специального и гражданского назначения.



УДК 621.382

Влияние морфологии поверхности на осцилляции некоторых электрических параметров гетероструктур на основе AlGa_n/GaN

Шутов Д. Г.¹, Колковский Ю. В.^{1,2}, Торхов Н. А.¹, Жабина Е. Ю.¹¹ АО «НПП «Пульсар»

105187, г. Москва, Окружной проезд, 27

administrator@pulsarnpp.ru

² МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

rector@mirea.ru

Предлагаются результаты исследования влияния морфологии поверхности гетероструктур на кинетические параметры двумерного электронного газа (2DEG) такие как подвижность и концентрация носителей, электропроводимость. Расчеты проводились с использованием теории квантового размерного эффекта.

Ключевые слова: квантовый размерный эффект; энергетические спектры; геометрия пленок.

Из анализа зонных диаграмм гетероперехода Al_xGa_(1-x)N/GaN видно, что в узкой области металлургической границы гетероперехода со стороны GaN реализуется потенциальная яма. В результате чего электронный газ локализуется в сверхтонком слое пленки, толщина которого оказывается соизмерима с дебройлевской длиной волны носителя в GaN и на несколько порядков превышает межатомные расстояния. В этом случае движение носителя в направлении нормальном к границе раздела (k_z) квантуется, энергетический спектр становится частично дискретным, следовательно, имеет место квантовый размерный эффект (РКЭ). Энергетический спектр и плотность квантовых состояний определяются решением стационарного уравнения Шредингера при аппроксимации функции потенциала бесконечно глубокой потенциальной ямой. Состояние электрона проводимости в области рассматриваемой пленки определяется тремя квантовыми числами (n, k_x, k_y), где принимает целые положительные значения. Движение электрона в двумерном k пространстве (k_x, k_y) непрерывно, а по третьему направлению запрещено, или ограничено перемещениями между энергетическими подзонами.

В связи с этим, из теории РКЭ следует [1–2], что каждая подзона в плотность квантовых состояний дает одинаковый вклад и при фиксированной толщине пленки и определенном n плотность состояний в подзоне не зависит от энергии носителя. При достижении энергии носителей значений, соответствующих энергии подзоны $n+1$, плотность квантовых состояний увеличивается скачком до значения плотности состояния в монолитном образце и далее вновь перестает зависеть от энергии. Таким образом, функция зависимости плотности состояний от энергии носителей немонотонна и носит ступенчатый характер, что может приводить к осцилляции электрических параметров гетероструктуры в области 2DEG (или в области канала НЕМТ при изменении напряжения сток — исток U_{sd}). С другой стороны, если зафиксировать энергию носителей в гетероструктуре с 2DEG

(в случае НЕМТ $U_{SD} = \text{const}$) то из теории РКЭ следует, что при изменении толщины пленки плотность состояния изменяется как функция обратная к толщине пленки, до тех пор, пока (с ростом толщины) дно следующей подзоны не опустится ниже заданной энергии носителя, при этом плотность состояний скачком возрастает до значений плотности состояний в монокристаллическом образце. В этом случае мы можем наблюдать осцилляции электрических параметров в зависимости от геометрических параметров пленки.

В результате, на основе теории РКЭ были рассчитаны спектры подзон GaN, установлена в явном виде корреляция между толщиной пленки и энергией спектров, рассчитаны периоды осцилляции и зависимости некоторых электрических параметров гетероструктур на основе AlGaIn/GaN от морфологии их поверхности. Кроме того, даны рекомендации по требованиям к геометрии гетероструктур и параметрам шероховатости.

Литература

1. Шутов Д. Г. Особенности роста пленок GaAs и GaN в процессе MOCVD // Тезисы докладов, юбилейная научно-техническая конференция «СВЧ-электроника-2023», АО «НПП «Исток» им. Шокина».
2. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ-транзисторы на широкозонных полупроводниках. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2001. — 256 с.



УДК 621.382

Физические основы повышения воспроизводимости базовых технологических процессов промышленного производства GaN ЭКБ высокого уровня сложности

Торхов Н. А.¹, Колковский Ю. В.^{1,2}, Шутов Д. Г.¹

¹ АО «НПП «Пульсар»

105187, г. Москва, Окружной проезд, 27

administrator@pulsarnpp.ru

² МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

rector@mirea.ru

Предлагаются новые физические пути достижения воспроизводимости базовых технологических процессов основанные на использовании синергетических закономерностей в процессах перехода от хаоса к порядку и обратно в сложных открытых и закрытых технологических системах производства GaN ЭКБ.

Ключевые слова: GaN ЭКБ; технологические процессы; синергия; воспроизводимость.

В общем случае промышленный процесс производства электронной компонентной базы (ЭКБ) определяется физикой технологических процессов и их совместимостью, качеством материалов и СМК (система менеджмента качества) предприятия. Как показывает практический опыт, даже жестко контролируемое предприятием выполнение всех организационных предписаний не гарантирует в настоящее время получение требуемых технологических результатов практически на всех этапах промышленного производства ЭКБ даже при наличии требуемого качества используемых материалов. В связи с тем, что «супермаркет» зарубежных технологий закрыт без преодоления научно-технической проблемы воспроизводимости технологических процессов невозможно повысить качество, увеличить процент выхода современной $A^{III}B^V$ (в частности, GaN) ЭКБ, снизить ее себестоимость, повысить рентабельность предприятий, решить задачи импортозамещения, обеспечить технологическую безопасность.

В связи с этим, для решения комплекса задач, направленных на повышение воспроизводимости базовых технологических процессов предлагается использовать преимущества междисциплинарного подхода, основанного на фундаментальном и прикладном изучении и применении различных синергетических закономерностей в процессах перехода от хаоса к порядку и обратно, как в открытых, так и в закрытых нелинейных микро- и нано- системах физической природы.

На основе этого мы предлагаем использовать новые зарекомендовавшие себя подходы (например, [1–2]) и научно-технические пути достижения воспроизводимости базовых технологических процессов основанных на разработке и применении новых метрических методов для контроля и управления физическими, химическими и другими аддитивными параметрами технологических процессов, литографии, вакуумного нанесения тонкопленочных металлических и диэлектрических покрытий для целей повышения процента выхода годной $A^{III}B^V$ ЭКБ при

серийном производстве на отечественных предприятиях электронной промышленности реального сектора экономики.

Литература

1. Torkhov N. A., Gradoboev A. V., Orlova K. N., Toropov A. S. Physical nature of size effects in TiAlNiAu/GaN ohmic contacts to AlGaIn/GaN heteroepitaxial structures // *Semicond. Sci. Technol*, 2022. Vol. 37. P. 055023 (9 pp). URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ac557e>.
2. Torkhov N. A., Evstigneev M. P., Babak L. I., Kokolov A. A. The Fractal Geometry of TiAlNiAu Thin Film Metal System and Its Sheet Resistance (Lateral Size Effect) // *Symmetry*, 2021. Vol. 13. P. 2391. DOI: 10.3390/sym13122391.



УДК 621.37

Разработка структурно-параметрических электрических схем замещения дросселей, конденсаторов и проводов для проектирования высокочастотных фильтров радиопомех на отечественной элементной базе для авиационно-космических радиоэлектронных систем

Дмитриков В. Ф.¹, Вялов А. А.², Исаев В. М.³, Куневич А. В.⁴, Шушпанов Д. В.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, корп. 1, лит. А, Ж
Dmitrikov_VF@mail.ru, dimasf@inbox.ru

² АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

³ АО «Российская электроника»

121357, г. Москва, ул. Верейская, 29, стр. 141

⁴ ООО «СЗЛ»

196128, г. Санкт-Петербург, ул. Варшавская, 5А

Разработаны структурно-параметрические схемы замещения пассивных элементов (дросселей, конденсаторов) и проводов с учетом их взаимного влияния друг на друга как через основные параметры, так и через паразитные параметры (учтено влияние «паразитной» магнитной связи и «паразитной» электрической связи).

Ключевые слова: фильтр радиопомех; дроссель; конденсатор; схема замещения; электромагнитная совместимость.

Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) высокоэффективных импульсных усилителей класса D (для усиления информационных сигналов) и импульсных преобразователей напряжения (ИПН) (для преобразования энергии одного вида в другой) используются сетевые фильтры радиопомех (ФРП), предназначенные для защиты первичных источников энергии от электромагнитных помех (ЭМП), генерируемых ИПН и усилителями класса D, а также для защиты ИПН и усилителей класса D от ЭМП в сети.

Разработка и проектирование ФРП для авиационно-космических систем должны осуществляться с учетом минимизации их массогабаритных параметров, обеспечения требуемого подавления ЭМП в заданном широком диапазоне частот с перекрытием защищаемого частотного диапазона в десятки тысяч раз — от единиц кГц до сотен МГц и обеспечения устойчивой работы системы «ФРП — ИПН» [1].

Доказано влияние и на ослабление ЭМП фильтра, и на величину выходного сопротивления ФРП, а, следовательно, устойчивость системы «ФРП — ИПН» величины эквивалентного сопротивления первичного источника и входного сопротивления ИПН [2].

Решение проблемы требуемого ослабления ЭМП в диапазоне частот с перекрытием по частоте в тысячи — десятки тысяч раз с помощью сетевых ФРП с паразитными параметрами конденсаторов и дросселей, которые препятствуют ослаблению ЭМП, начиная с частот единиц-десятки МГц, резко усложняется, поскольку

эти параметры не предоставляются разработчиками конденсаторов и дросселей. Поэтому при проектировании ФРП разработчику необходимо знать частотные характеристики импедансов (комплексных сопротивлений) дросселей и конденсаторов, а также их точные высокочастотные эквивалентные электрические структурно-параметрические схемы замещения в широком диапазоне частот до 100 МГц и выше, хорошо адаптируемые к современным вычислительным программам схемотехнического моделирования [3, 4].

При корректном проектировании ФРП кроме знания схем замещения элементов необходимо также учитывать взаимное влияние паразитных параметров одних элементов на паразитные параметры других элементов. Данный доклад посвящен разработке структурно-параметрических схем замещения пассивных элементов (дросселей, конденсаторов) и проводов с учетом их взаимного влияния друг на друга как через основные, так и через паразитные параметры. В них учитывается влияние «паразитной» магнитной и «паразитной» электрической [5] связей, которые возникают между различными элементами (между отдельными дросселями, между дросселем и конденсатором, между конденсаторами), между элементами и проводом.

Полученные результаты использованы как при проектировании перспективных конденсаторов и дросселей, так и радиоэлектронной аппаратуре на их основе.

Литература

1. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. — М.: Горячая линия — Телеком, 2019. — 540 с.
2. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В., Петроченко А. Ю., Караев Ф. Ш. исследование влияния паразитных параметров дросселей и конденсаторов, заземления, эквивалента сети и источника питания на ослабление ФРП // V научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2021. Материалы XIX Международной научно-технической конференции. — Самара, 2021. — С. 274–275.
3. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. Эквивалентная схема замещения диэлектрика в широком диапазоне частот (0 Гц — 500 МГц) // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2021. — Т. 24. — № 4. — С. 43–57.
4. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В., Фоченков Э. А. Эквивалентная схема замещения дросселя на нанокристаллическом сердечнике с большой магнитной проницаемостью // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2022. — Т. 25. — № 4. — С. 100–121.
5. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. К вопросу использования емкостно-связанных элементов для объяснения взаимного влияния электрических проводов // Радиотехника, 2024. — Т. 88. — № 1. — С. 15–30.



УДК 621.3.049

Применение СВЧ-устройств большой и сверхбольшой мощности. Объемы рынка. Стратегические направления развития

Парамонов Ю. Н., к. т. н.

АО «НПП «Торий»

117342, г. Москва, ул. Обручева, 52, стр. 2, пом. 68

В докладе представлено исследование существующего рынка СВЧ-устройств большой мощности. Описаны существующие проблемы и представлены направления развития СВЧ-техники.

Ключевые слова: СВЧ-техника; твердотельные СВЧ-приборы; электровакуумные СВЧ-приборы; линейные ускорители.

Твердотельная техника СВЧ бурно развивается в последние годы — в результате освоения технологий изготовления микроволновых монолитных интегральных схемы с каждым годом удается поднимать их КПД и удельные мощности. Этот процесс сопровождается освоением больших частот, уменьшением габаритов модулей, снижением их веса и удешевлением. Твердотельные изделия высокой мощности замещают электровакуумные в бортовых РЛС и аппаратах РЭБ за счет суммирования мощностей нескольких модулей, однако с этим связано и основные препятствия для развития:

- несмотря на низкую стоимость отдельного модуля, за счет необходимости применения огромного количества модулей итоговая стоимость каскада оказывается высокой;
- необходимость использования большого числа модулей, приводит к значительному увеличению габаритов комплекса;
- модули в каскаде необходимо согласовывать, что осложняет конструкцию необходимостью вводить дополнительные устройства. При этом итоговое КПД каскада оказывается ниже, чем КПД отдельного модуля.

Таким образом, электровакуумная техника СВЧ обладает преимуществом в тех областях, где требуются значительные мощности при минимальных габаритах. Это области применения радиолокационных и зенитно-ракетных комплексов, загоризонтных РЛС, дальней космической связи, линейных ускорителей — станции стерилизации, станции дефектоскопии, инспекционно-досмотровые комплексы, комплексы радиационного воздействия, комплексы лучевой терапии, крупные научные «мегасайнс» проекты и т. д.

Существующие электровакуумные решения и новые разработки определяют основные тактико-технические характеристики конечных комплексов и образцов ВВСТ и являются ориентирами для долгосрочного направления развития твердотельной СВЧ-техники.

УДК 621.382

Разработка и исследование инерциальных приборов и микросистем с использованием МЭМС

Тимошенков С. П.*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

Проведен анализ инерциальных приборов МЭМС, используемых в беспилотных подвижных объектах. Разработаны микросистемы для использования в задачах определения параметров движения, а также задачах навигации на коротких временных интервалах на основе инерциальных МЭМС. Разработаны и исследованы оригинальные конструкции емкостных микроакселерометров.

Ключевые слова: микроакселерометры; БИНС; датчики угловой скорости (микрогироскопы); микросистемы; инерциальные измерительные комплексы. БПЛА.

В настоящее время инерциальные МЭМС (микроакселерометры, микрогироскопы и инерциальные измерительные комплексы) являются широко востребованными приборами и системами, обеспечивающими возможность осуществления пространственной ориентации, стабилизации и навигации различных подвижных объектов.

В работе приведены результаты исследования инерциальных приборов, разработанных в МИЭТ. Разработана и исследована конструкция и технология создания чувствительного элемента микроакселерометра, функционирующего на основе изменения относительной диэлектрической проницаемости межэлектродного пространства конденсаторной системы. Показана перспектива создания инерциальных измерительных модулей в гибридном исполнении (отдельные кристаллы усилителей, генератора, АЦП, микроконтроллера объединенные в микросборке. Приведены результаты исследований, создания и применения инерциальных микросистем для беспилотного транспорта.

Литература

1. Тимошенков С. П., Тимошенков А. С., Анчутин С. А., Кочурина Е. С. Исследование влияния степени вакуумирования на добротность колебательного контура чувствительного элемента МЭМС-датчика // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2023. — Т. 28. — № 5. — С. 642–648.
2. Вавилов В. Д., Тимошенков С. П., Тимошенков А. С. Микросистемные датчики физических величин: Монография в двух частях // М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. — С. 550.



УДК 621.3.049

Разработка МЭМС-акселерометра для измерения линейного ускорения при сильных механических ударах

Ткаченко А. В.¹, Лысенко И. Е.^{1,2}, д. т. н., Платонов Д. Д.¹, Юркин Н. О.¹,
Фролова А. О.¹

¹ ООО «Матпер»

109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, к. 5

alexey.tkachenko@mapperllc.ru

² УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Представлен разработанный ЧЭ пьезорезистивного МЭМС-акселерометра с одной осью чувствительности. Выполнен статический, динамический, модальный, гармонический конечно-элементный анализ, анализ усталостной прочности, а также расчет чувствительности.

Ключевые слова: МЭМС; акселерометр; сильный механический удар.

Разработанный чувствительный элемент (ЧЭ) пьезорезистивного микроэлектро-механического (МЭМС) акселерометра с одной осью чувствительности предназначен для измерения линейного ускорения в условиях действия сильных механических ударов в полном диапазоне: $\pm 60\,000g$. ЧЭ МЭМС-акселерометра состоит из трех пластин кремния: пластина-крышки, пластина-приборный слой, пластина-основание. Чувствительная масса (ЧМ) выполнена в Х-образной геометрической форме и подвешена по средством четырех прямоугольных упругих подвесов следующим образом: два на передней стороне, два на обратной стороне пластины, что ограничивает перемещение ЧМ в поперечных плоскостях. В областях с наибольшей концентрацией механических напряжений при растяжении-сжатии упругих подвесов сформированы резистивные области. Измерительная схема считывания сигнала при действии линейного ускорения реализована по схеме моста Уитстона.

В представленной работе выполнены следующие виды расчетов: статический, динамический, модальный, гармонический конечно-элементный анализ, а также анализ усталостной прочности на основе напряжений и деформаций как во временной, так и в частотной областях, а также расчет чувствительности. Численное моделирование проводилось в программной среде ANSYS Multiphysics и Matlab.

УДК 621.3.049

Конструктивно-технологические аспекты изготовления МЭМС-акселерометра емкостного типа**Фролова А. О.¹, Платонов Д. Д.¹, Юркин Н. О.¹, Ткаченко А. В.¹, д. т. н., Лысенко И. Е.^{1,2}**¹ ООО «Mapper»

109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, к. 5

alena.frolova@mapperllc.ru

² УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Приведено решение проблемы шунтирования рабочих электрических емкостей, локализованных в областях сращивания составных частей ЧЭ МЭМС-акселерометра емкостного типа, основанное на конструктивных изменениях, отработке ряда технологических способов, а также совокупности эмпирических данных.

Ключевые слова: МЭМС; акселерометр; разделение пластин.

Рассматриваемый чувствительный элемент (ЧЭ) МЭМС-акселерометра емкостного типа состоит из трех электроизолированных пластин кремния, соединенных методом прямого сращивания пластин (Si:SiO₂): пластины-крышки, приборного слоя с сформированной чувствительной массой (ЧМ) и пластины-основания. ЧМ является подвижным электродом и выполнена в форме прямоугольной пластины, расположенной между двумя неподвижными электродами, образуя два переменных конденсатора. При испытании работоспособности изготовленного ЧЭ МЭМС-акселерометра были обнаружены паразитные короткие замыкания между ЧМ и неподвижными электродами, вызывающие шунтирование рабочих электрических емкостей, не имеющее системной повторяемости.

В результате выполненной работы было установлено, что при выполнении операции дисковой резки кремниевых пластин, образующиеся при этом кремниевые частицы, могут плотно соединиться с электроизоляционным слоем SiO₂, образуя тонкий проводящий слой. Совместно с заказчиком была выполнена оптимизации конструкции ЧЭ МЭМС-акселерометра, которая заключалась в уменьшении ширины ЧМ для того, чтобы исключить контакт интерфейса ЧЭ с лезвием при выполнении операции разделения пластин.



УДК 533.924

Разработка инерциальных микросистем на базе емкостных встречно-штыревых структур

Соловьев А. А.^{1,2}, Баклыков Д. А.^{1,2}, Стукалова В. Е.², Пильник И. С.²,
Курочкина Ю. А.², Родионов И. А.^{1,2}

¹ Научно-исследовательский институт автоматики им. Духова
127030, г. Москва, ул. Суцеская, 22

² НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1
irodionov@bmsu.ru

В работе представлены технологические возможности и особенности формирования элементной базы инерциальных МЭМС-устройств на базе емкостных встречно-штыревых электродов. Разработан маршрутно-технологический процесс, обеспечивающий возможность создания МЭМС-устройств на базе кремний-стекло. Также демонстрируется возможность бездефектного высокоаспектного травления каналов для чувствительных электродов.

Ключевые слова: МЭМС; инерциальные устройства; Bosch-процесс; встречно-штыревые структуры; электростатический актюатор; кремний-на-стекле; высокоаспектные каналы.

Акселерометры и гироскопы являются одними из наиболее популярных МЭМС-устройств на встречно-штыревых структурах, способные измерять линейное ускорение и угловую скорость соответственно, что позволяет использовать их в системах навигации и геолокации, стабилизации, ориентации, а также для контроля вибраций [1–2]. На сегодняшний день амплитудные МЭМС-гироскопы и акселерометры достигли около-навигационного и навигационного класса соответственно по нестабильности смещения ($0,1^\circ/\text{час}$; 1 мкг) и случайному блужданию угла/скорости ($0,01^\circ/\sqrt{\text{час}}$; $0,001 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$) [3–4]. Более того в последнее время осуществляется множество исследований, посвященных инерциальным микросистемам с частотной модуляцией, имеющих одну технологическую и конструктивную базу с амплитудными датчиками [5–6]. Основными элементами инерциальных датчиков являются основание, корпус, электроды считывания, электроды актуации (в основном для гироскопов) и подвесная масса на упругих элементах, что обеспечивает смещение системы под воздействием физических явлений и последующее его преобразование в изменение емкости между электродами.

Для реализации всех конструктивных элементов, включая встречно-штыревые электроды (как наиболее ответственных узлов с малой шириной и высоким аспектным соотношением), инерциальных микросистем используется процесс глубокого плазменного травления — Bosch процесс для достижения высокоаспектных каналов в кремнии. Разработана технология формирования конструктивных элементов инерциальных микросистем на базе кремний-стекло, обеспечивающая бездефектный профиль на границе с диэлектриком, аспектное отношение более 25 с углом профиля $90 \pm 1^\circ$ для структур шириной от 5 до 1000 мкм и равномерностью не хуже 5% по 100 мм пластине.

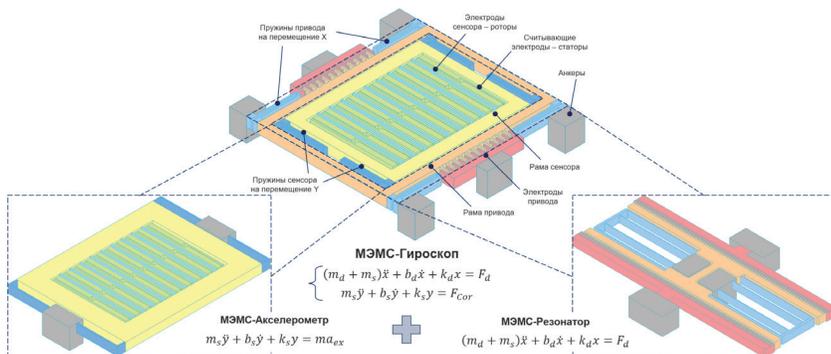


Рис. 1. МЭМС-акселерометр и гироскоп

Литература

1. Zhang H. et al. A review of symmetric silicon MEMS gyroscope mode-matching technologies // *Micromachines*, 2022. Vol. 13. № 8. С. 1255.
2. Langfelder G., Tocchio A. *Microelectromechanical systems integrating motion and displacement sensors* // Smart Sensors and MEMS. Woodhead Publishing, 2018. P. 395–428.
3. Varanis M. et al. MEMS accelerometers for mechanical vibrations analysis: A comprehensive review with applications // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018. Vol. 40. P. 1–18.
4. Wang Y. et al. Concepts, roadmaps and challenges of ovenized MEMS gyroscopes: A review // *IEEE sensors journal*, 2020. Vol. 21. № 1. P. 92–119.
5. Langfelder G., Bestetti M., Gadola M. Silicon MEMS inertial sensors evolution over a quarter century // *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2021. Vol. 31. № 8. P. 084002.
6. Zhang Z. et al. A Review on MEMS Silicon Resonant Accelerometers // *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2024.

УДК 621.3.049

Исследование влияния технологических процессов на величину остаточных напряжений в упругих подвесах кольцевого вибрационного МЭМС-гироскопа

Юркин Н. О.¹, Платонов Д. Д.¹, Ткаченко А. В.¹, Фролова А. О.¹,
Лысенко И. Е.^{1,2}, д. т. н.

¹ ООО «Мэппер»

109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, к. 5
nikita.yurkin@mapperllc.ru

² УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Приведено решение устранения остаточных напряжений в упругих подвесах ЧЭ кольцевого вибрационного МЭМС-гироскопа, основанное на выявленном влиянии отдельных технологических процессов, выработанных технологических способах устранения данного явления, а также совокупности полученных эмпирических данных.

Ключевые слова: МЭМС; гироскоп; кольцевой; вибрационный; упругие подвесы; остаточное напряжение.

Рассматриваемый чувствительный (ЧЭ) кольцевого вибрационного МЭМС-гироскопа состоит из жесткой и неподвижной рамки, выполняющей роль приборного слоя, внутри которой при помощи упругих подвесов, имеющих зигзагообразную форму, свободно вывешена упруго деформируемая чувствительная масса (ЧМ), выполненная в форме кольца. Возникающие и накапливаемые в результате отдельных технологических операций, остаточные напряжения в тонкопленочных структурах, формируемых на поверхности упругих подвесов, приводят к изгибу упругих подвесов, что в свою очередь является следствием изменения плоскости колебаний ЧМ. Максимальное значение отклонения плоскости упругих подвесов относительно плоскости жесткой и неподвижной рамки составляет не более 50 нм в вертикальном направлении.

В результате выполненной работы удалось уменьшить остаточные напряжения в упругих подвесах ЧЭ МЭМС-гироскопа, путем обнаружения влияния отдельных технологических процессов и формируемых слоев на допустимое значение остаточных напряжений и изгиб упругих подвесов в вертикальном направлении, отработки технологических способов устранения данного явления, а также совокупности эмпирических данных.

УДК 621.3.049.779

Исследование экспериментальных МЭМС-акселерометров с ЧЭ планарного типа

Анчутин С. А.^{1,2}, Кочурина Е. С.^{1,2}, к. т. н., Дернов И. С.^{1,2}, Галкин А. А.^{1,2}, Тимошенков А. С.^{1,2}, д. т. н.

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

² ООО «Лаборатория Микроприборов»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

step@mail.ru, ekochurina@mp-lab.ru, idernov@mp-lab.ru, agalkin@mp-lab.ru, at@

mp-lab.ru, spt111@mail.ru

Приведено описание МЭМС-датчика с ЧЭ планарного типа. В работе представлены методы оценки основных параметров разработанного МЭМС-акселерометра. Дано описание стенда для проведения исследований. Приведены результаты проведенных исследований.

Ключевые слова: чувствительный элемент; МЭМС-акселерометр; стенд для проведения испытаний; результаты исследований.

В работе рассматривается разработанный и изготовленный МЭМС-акселерометр, в состав которого входит чувствительный элемент планарного типа. Чувствительный элемент изготавливается при помощи технологии плазменного химического травления кремния на базе КНИ-структур. Экспериментальные образцы были изготовлены с одним ЧЭ и с двумя ЧЭ, подключенными параллельно.

Проводились исследования изготовленных МЭМС-акселерометров в целях определения статических параметров (смещение нуля и масштабный коэффициент), случайных параметров (определения шумов и нестабильности смещения нуля по диаграмме Аллана) и климатические испытания (определены зависимость смещения нуля и масштабного коэффициента от изменения температуры).

Исследования проводились на собранном стенде на базе одноосного поворотного стола в поле силы тяжести Земли. Данные собирались при точно выставленных значениях положения датчика по отношению к вектору силы тяжести Земли. Угол задавался в диапазоне 0–360° с шагом 30° и данные записывались в течение 10 секунд в каждой установленной точке.

В работе также приводятся значения полученных параметров МЭМС-акселерометров в сравнении: с одним чувствительным элементом и с двумя, размещенными рядом.

Литература

1. Кочурина Е. С., Анчутин С. А., Калугин В. В., Зарянкин Н. М., Тимошенков А. С., Дернов И. С. Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра // Известия вузов. Электроника, 2022. — № 27 (1). — С. 59–67.
2. Кочурина Е. С., Анчутин С. А., Мусаткин А. С., Дернов И. С., Тимошенков А. С., Полушкин В. М., Тимошенков С. П. Разработка и исследование МЭМС-акселерометра. Российский форум «Микроэлектроника-2021», 7-я Научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник докладов. Крым, г. Алушта, 03 октября — 09 октября 2021 г. — С. 235–238. DOI: 0.22184/1993-8578.2022.15.8s.235.238.

УДК 621.382.2

Технологические аспекты изготовления микромеханического датчика удара

Кочурина Е. С.^{1,2}, Виноградов А. И.^{1,2}, Калугин В. В.¹, Зарянкин Н. М.^{1,2},
Боев Л. Р.^{1,2}, Тимошенков А. С.^{1,2}, Салогуб М. В.³

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

viktor118@mail.ru

² ООО «ЛМП»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

³ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30

В данной работе представлены технологические аспекты получения микромеханического датчика удара. Рассмотрены результаты исследования процесса плазмохимического травления для формирования вертикальных щелей в кремнии. Представлен способ получения кремниевых элементов заданной конструкции. Проведен анализ влияния параметров процесса травления на форму микромеханических элементов.

Ключевые слова: плазмохимическое травление; структура кремний на изоляторе; кремниевый элемент; датчик удара.

Параметры изготовленных микромеханических элементов зависят не только от их конструкции, но и от выбора материалов и технологий, используемых для их изготовления. При производстве чувствительных элементов микромеханических датчиков удара рассматриваемой конструкции применяют структуры кремний на изоляторе (КНИ). Структуры КНИ позволяют обеспечить технологические и экономические преимущества при получении микромеханических элементов по сравнению с обычными пластинами кремния, а также производить изделия, которые невозможно изготовить с использованием других методов.

Особенности технологии датчика удара состоят в применении плазмохимического травления для формирования глубоких вертикальных щелей в кремнии; анализе влияния технологических погрешностей на форму микромеханических элементов. Помимо травления кремния важными процессами являются: жидкостная химическая обработка, фотолитография, формирование технологических слоев, травление оксида кремния и др.

Для разработки режимов травления глубоких канавок в кремнии с использованием плазмохимического «Bosch» — травления производилось изменение следующих параметров: расход газов SF₆ и C₄F₈, скважность их подачи, мощность ИСР источника и смещения, температура подложкодержателя и давление в камере во время процесса.

Получена заданная конструкция микромеханического элемента с приемлемой вертикальностью кремниевого профиля, отсутствием дефектов травления. Сочетание традиционных технологий микроэлектроники и специальных технологических и конструктивных решений в микросистемной технике открывает новые технические возможности и обеспечивает микромеханическим приборам широкие области применения.

УДК 621.3.049

Разработка микромеханического акселерометра с тремя осями чувствительности с диапазонами регистрации ускорений $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ и $\pm 16g$ Лысенко И. Е.^{1,2}, д. т. н., Ткаченко А. В.¹, Платонов Д. Д.¹, Юркин Н. О.¹,
Фролова А. О.¹¹ ООО «Маттер»

109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, к. 5

ingvarlys@gmail.com

² УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Представлен разработанный МЭМС-акселерометр с тремя осями чувствительности. Проведены модальный и статический анализ, определены параметры конструкции, изготовлены экспериментальные образцы сенсора.

Ключевые слова: МЭМС; акселерометр; прототип.

Разработанный микроэлектромеханический (МЭМС) акселерометр предназначен для регистрации линейного ускорения по трем осям чувствительности в следующих четырех поддиапазонах: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ и $\pm 16g$

с перестройкой системы подключения неподвижных электродов емкостных преобразователей перемещений без изменения конструкции МЭМС-устройства. Конструктивно МЭМС-акселерометр состоит из двух инерционных масс, подвижных и неподвижных электродов и различных подвесов [1, 2].

В работе был проведен полный комплекс исследований: разработаны параметризуемые математические модели, проведено моделирование перемещений чувствительных элементов под действием линейных ускорений. Моделирование проводилось на основе разработанной математической модели при использовании языка высокого уровня VHDL-AMS и численного моделирования в программной среде ANSYS. На основе проведенных исследований была разработана топология МЭМС-акселерометра и изготовлены прототипы по технологии поверхностной микрообработки.

Литература

1. Lysenko I. E., Wu Gang, Xu Bao, Xu Yuan; MEMS linear accelerometer and method of formation. CN 113419081 B.
2. Lysenko I. E., Wu Gang, Xu Bao, Xu Yuan; MEMS accelerometer and forming method therefor. CN 113702665 B.



УДК 53.087.9

Программно-аппаратный комплекс автоматических измерений микроэлектромеханических (МЭМС) изделий

Чельшев Л. С.¹, Тимошенков С. П.²

¹АО «Завод ПРОТОН»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

leonid.chelyshev@live.ru

В рамках работы разработан программно-аппаратный комплекс, необходимый для автоматической проверки современных российских МЭМС-устройств. Приведен общий вид, схема изделия, описан метод работы.

Ключевые слова: МЭМС; автоматизация; измерения; методы измерений.

Целью работы является создание программно-аппаратного комплекса тестирования микроэлектромеханических (МЭМС) систем. Это необходимо для повышения качества разрабатываемой продукции и уменьшения количества отказов/несоответствий заявленным характеристикам.

В начале работы были проанализированы существующие системы, это, например, «Тестер функционального контроля FT-17HF» (на базе оборудования фирмы Multitest, Германия), «The Industry Standard in High Efficiency, Low Cost Test J750Ex-HD Family» (Teradyne, USA), «Test System Optimized for High-Performance Digital and SoC FLEX» (Teradyne, USA).

Основой изделия является 2 микроконтроллера это STM32F303RBT6, а также STM32F103C8T6. F303 отвечает за восприятие информации от датчиков их накопления и анализ, с помощью F103 происходит управление самой системой и отправка результатов на другие изделия для управления или накопления информации. F303 имеет различные интерфейсы подключения необходимые для работы изделия по таким каналам как аналоговый, I2C, SPI.

В работе представлена структурная схема, а также общий вид получившегося изделия. Помимо этого, создан корпус, и смоделирована работа изделия.

Было создано программное обеспечение для работы изделия. На данный момент идет процесс проверки и тестирования макетного образца. Результаты работы могут быть использованы для получения опыта в сфере тестирования электромеханических датчиков и дальнейшей работы над их усовершенствованием.

УДК 681.586.72

Разработка и исследование ИКНС на базе МЭМС**Соломкина Н. А.^{1,5}, Захаров В. П.^{2,5}, Галкин А. А.^{1,5}, Салогуб М. В.³,
Мельник К. К.⁴, Тимошенко А. С.^{1,5}**¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*² *Национальный исследовательский университет ИТМО**197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А*³ *АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»**197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30*⁴ *ООО «ЭЛИАРС»**124460, г. Зеленоград, ул. Конструктора Гуськова, 8, стр. 1*⁵ *ООО «Лаборатория Микроприборов»**124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6**nadezhda.its@gmail.com, valerazaha1@yandex.ru, at@mp-lab.ru*

В современном мире, где повсеместно развиваются беспилотный наземный, речной и воздушный транспорт, необходим постоянный мониторинг их пространственной ориентации и навигации. Для определения навигации и ориентации необходима система, объединяющая спутниковый приемник и инерциальные датчики. Для проектирования экономически выгодных, мало потребляющих и малогабаритных систем нашли свое применение МЭМС-датчики. В данной статье описана разработка системы на базе инерциальных МЭМС-датчиков и спутниковых приемников, а также испытания данной системы в реальных условиях.

Ключевые слова: МЭМС; инерциальные датчики; спутниковые приемники; ориентация; навигация; беспилотный транспорт.

С каждым годом все больше появляется инновационных проектов по созданию беспилотных систем, способных перемещаться в автономном режиме, например, речной трамвай [1] или беспилотное такси [2], а также беспилотные грузовые перевозки [3]. Для их корректной работы необходим постоянный мониторинг и определение их точной геолокации и ориентации в пространстве, что обеспечивается за счет комплексной системы, состоящей из инерциальных датчиков, спутникового приемника и прочих источников информации об окружающей обстановке. В плотно застроенных городах, а также в условиях с глушения сигнал ГНСС становится некорректным источником информации о положении, поэтому очень важной задачей является определение навигации и ориентации с помощью инерциальных датчиков, а именно датчиков угловой скорости, акселерометров, магнитометров и др. Для создания систем с малым потреблением, малыми массогабаритными показателями и экономически выгодных нашли свое применение МЭМС-датчики (микроэлектромеханические системы).

Для выполнения поставленной задачи необходимо устройство, которое выполняет следующие функции:

- вычисление и выдача данных углов ориентации (крен, тангаж, курс) и координат;

- передача поправок от базовой станции с помощью NTRIP-клиента, чтобы система работала в режиме RTK (сантиметровая точность вычисления координат);
- хранение операционной системы и программного обеспечения для работы алгоритмов ИКНС (например вычисления математической модели автомобиля);
- хранение данных об углах ориентации (крен, тангаж, курс) и координатах;
- возможность подключения разных типов приемников ГНСС и инерциальных датчиков для работы с разными параметрами точности и в разных условиях внешней среды;
- прием и передача данных по интерфейсам UART, SPI, I2C, CAN, SDMMC (SDIO), USB, LAN.

Для реализации устройства с данными функциями было разработано устройство, в состав которого входят два блока:

- блок инерциальной навигации (ИНС), в состав которого входят инерциальные датчики и вычислитель инерциальной навигации;
- блок спутниковой навигации (СНС), в состав которого входят ячейка ГНСС, ячейка одноплатного компьютерного модуля (ОКМ), встроенная flash-память для блоков ОКМ и ИНС, ячейка 3G/4G-модем (ОКМ и 3G/4G-модем нужны для реализации Ntrip-клиент, для возможности работы с сервисами поставщиков услуг RTK и PPP).

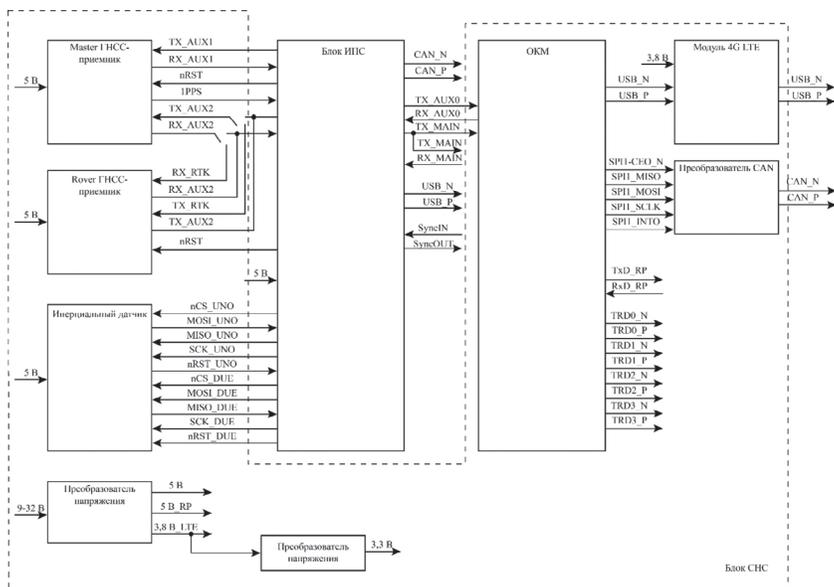


Рис. 1. Функциональная схема ИКНС

Блоки инерциальной навигации (ИНС) и спутниковой навигации (СНС) необходимы для вычисления инерциальной и спутниковой навигации с высокой точностью. Блок инерциальной навигации должен иметь возможность корректировать вычисленное навигационное решение по данным от датчиков скорости наземного транспорта и СНС. Данные от датчиков скорости ИНС получает по CAN шине транспортного средства со скоростью до 1 МБит/с. Блок СНС должен иметь реализованный Ntrip-клиент, для возможности работы с сервисами поставщиков услуг RTK и PPP. Блок СНС должен работать в двухантенном режиме для вычисления начальной ориентации в покое и дополнительной коррекции курса при равномерном движении.

На основании назначения были подобраны ячейки и разработана функциональная схема (рис. 1). Основными ячейками выступают Master и Rover ГНСС-приемники, Инерциальный датчик, Блок ИНС, ОКМ, модуль 4G LTE, преобразователи входного напряжения 9–32 В в 5/3,8/3,3 В, а также различные преобразователи интерфейсов. В устройстве выведены следующие цепи: USB ИНС, USB ОКМ, UART ИНС, UART/RS232 ОКМ, CAN ИНС, CAN ОКМ, выходы и входы синхронизации.

После подбора компонентов и разработки схем были разработаны платы и выбран корпус в виде профиля, состоящего из двух половин и панелей-заглушек. Корпус доработан с учетом выходных разъемов и посадочных мест для плат.

Для выполнения требований технического задания все компоненты были размещены на материнской плате размером 125×80 мм. Внешний вид согласно рис. 2. Для жесткости конструкции, особенно в области инерциальных датчиков, разработан кронштейн из D16T. Все компоненты фиксируются с помощью разъемов и винтов.

Размеры платы ГНСС-приемника ZED F9P 52×22 мм и внешний вид согласно рис. 3. Т.к. ZED F9P одноантенный приемник, поэтому в исполнении ИКСНС с данным типом приемника используется две идентичные платы.

Блок ИНС — ячейка приборного уровня, т.е. под нее разработан собственный корпус и блок ИНС может выступать как самостоятельное изделие. Внешний вид согласно рис. 5.

Собранное воедино устройство выглядит согласно рис. 6. Т.к. контроллер RPi греется, поэтому разработан радиатор из M1.

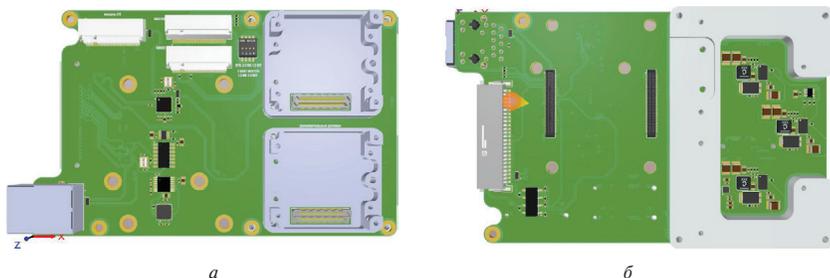


Рис. 2. Топология материнской платы: а) вид сверху, б) вид снизу



Рис. 3. Топология ГНСС приемника ZED F9P

Размеры проходной платы 66×33 мм и внешний вид согласно рис. 4.

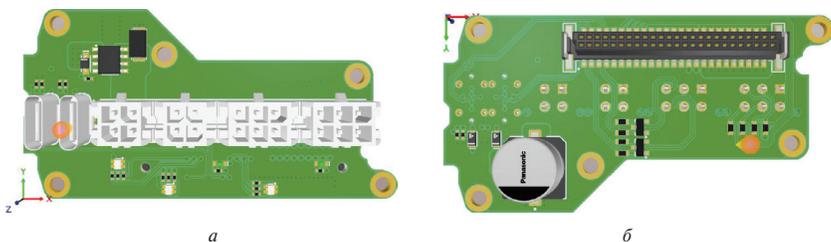


Рис. 4. Топология проходной платы: а) вид сверху, б) вид снизу

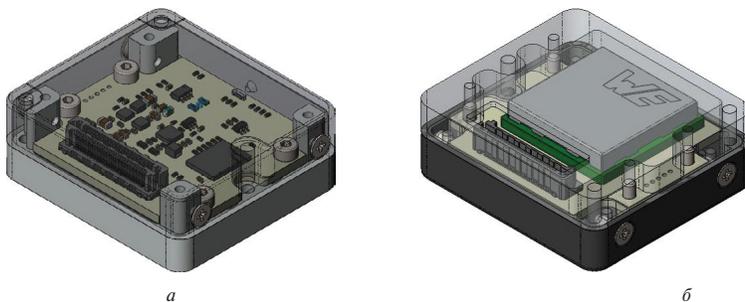


Рис. 5. Внешний вид БЛОК ИНС: а) вид сверху, б) вид снизу

В техническом задании предъявлены требования к выходным интерфейсам, назначение выходных разъемов ИКСНС согласно рис. 7.

Данный прибор был испытан в реальных условиях, после чего были получены и проанализированы результаты.

Для проведения испытаний были использованы заезды на полигоне ОЭЗ «Алабуга» для тестирования БПТС в рамках конкурса Up Great «Пятый уровень». ИКСНС была установлена на бортовой электрической газели Next с помощью оснастки в виде дюралевой пластины с четырьмя установочными отверстиями под ИКСНС (рис. 8).



Рис. 6. Внешний вид ИКЧС:
а) внешний вид, б) вид сверху без крышки, в) вид снизу без крышки

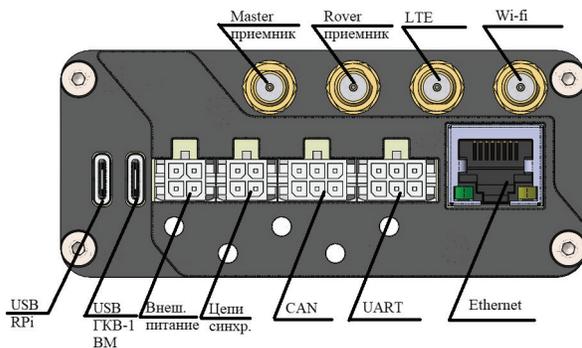


Рис. 7. Назначение разъемов ИКЧС

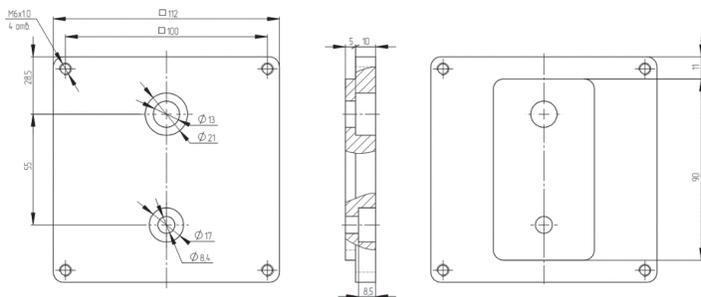


Рис. 8. Оснастка для установки ИКЧС

Для проведения испытаний к ИКЧС были подключены ГНСС-антенны и антенна 3G, установленные на крыше, источник питания и CAN-шина (рис. 9).

В ходе испытаний была выполнена запись данных, а после расчет параметров и анализ результатов.



Рис. 9. Размещение ИКНС: а) Установка ИКНС, б) подключение оборудования, в) установка антенн

Для проверки функциональности изделия были оценены следующие параметры:

- спектральная плотность шума датчиков угловой скорости;
- случайное угловое блуждание датчиков угловой скорости (по дисперсии Аллана при 25 °С);
- стабильность смещения нуля в покое датчиков угловой скорости (по дисперсии Аллана при 25 °С);
- погрешность измерения горизонтальных координат (стандартное решение/RTK/PPP);
- погрешность измерения высоты (стандартное решение/RTK/PPP);
- погрешность измерения горизонтальной скорости;
- погрешность вычисления по крену, тангажу и курсу по комплексированному решению ИНС и в режиме RTK;
- погрешность работы в автономном режиме, после пропадания ГНСС;

Оценка данных параметров описана ниже.

Для того, чтобы оценить параметры ДУС, а именно спектральную плотность шума, случайное угловое блуждание и стабильность смещения нуля в покое, необходимо записать выходной сигнал ДУС по каждой оси и рассчитать данные параметры.

В результате расчетов параметры составили значения согласно табл. 1–3.

Таблица 1. Значения спектральной плотности шума ДУС по осям X, Y, Z

Зав. № ИКСНС	Измеренная спектральная плотность шума датчиков угловой скорости, % сГц ^{-1/2}			Спектральная плотность шума датчиков угловой скорости по осям X, Y, Z по ТЗ, % сГц ^{-1/2}
	X	Y	Z	
46012923001	0,0006	0,001	0,0022	0,01

Таблица 2. Значения случайного углового блуждания ДУС (по дисперсии Аллана при 25 °С)

Зав. № ИКСНС	Измеренное случайное угловое блуждание датчиков угловой скорости (по дисперсии Аллана при 25 °С), °/√ч			Случайное угловое блуждание датчиков угловой скорости (по дисперсии Аллана при 25 °С) по ТЗ, °/√ч
	X	Y	Z	
46012923001	0,0007	0,001	0,0018	0,2

Таблица 3. Значения стабильности смещения нуля в покое ДУС (по дисперсии Аллана при 25 °С)

Зав. № ИКСНС	Измеренная стабильность смещения нуля в покое датчиков угловой скорости (по дисперсии Аллана при 25 °С), °/ч			Стабильность смещения нуля в покое датчиков угловой скорости (по дисперсии Аллана при 25 °С) по ТЗ, °/ч
	X	Y	Z	
46012923001	0,07	0,09	0,16	10

Для оценки погрешностей измерения горизонтальных координат, высоты и скорости, необходимо записать выходной сигнал ИКСНС в движении по известным координатам и сравнить разницу. В результате был совершен проезд по ОЭЗ «Алабуга» (рис. 10), а результаты заезда представлены в табл. 4–6.



Рис. 10. Трек заезда в ОЭЗ «Алабуга»



Таблица 4. Значения погрешности измерения горизонтальных координат (стандартное решение/RTK/PPP)

Зав. № ИКСНС	Измеренная погрешность измерения горизонтальных координат (стандартное решение/RTK/PPP), м		Погрешность измерения горизонтальных координат (стандартное решение/RTK/PPP) по ТЗ, м
	X	Y	
46012923001	0,0175/0,00175	0,0180/0,00180	(1,5/0,03+1 ppm)

Таблица 5. Значения погрешности измерения высоты (стандартное решение/RTK/PPP)

Зав. № ИКСНС	Измеренная погрешность измерения высоты (стандартное решение/RTK/PPP), м	Погрешность измерения высоты (стандартное решение/RTK/PPP) по ТЗ, м
46012923001	0,0225/0,00225	(3/0,06+1 ppm)

Таблица 6. Значения погрешности измерения горизонтальной скорости

Зав. № ИКСНС	Измеренная погрешность измерения горизонтальной скорости, м/с	Погрешность измерения горизонтальной скорости по ТЗ, м/с
46012923001	0,006	0,05

Затем на определенных участках был отключен сигнал ГНСС и оценена погрешность работы в автономном режиме. Результаты представлены в табл. 7.

Таблица 7. Значения погрешности работы в автономном режиме, после пропадания ГНСС

Зав. № ИКСНС	Измеренная погрешность работы в автономном режиме, после пропадания ГНСС, м	Погрешность работы в автономном режиме, после пропадания ГНСС по ТЗ, м
46012923001	за 10 с — 0,05 за 30 с — 0,1 за 60 с — 0,2	за 10 с — не более 1 за 30 с — не более 5 за 60 с — не более 10

В ходе проведенной работы была разработана комплексная система на базе инерциальных датчиков и спутниковых приемников, была испытана в реальных условиях. Точность данной системы в определении координат составляет 0,1 см, а точность удержания положения в автономном режиме в течение одной минуты — 0,2 м.

Литература

1. Будущее стало настоящим: в Москве запустили футуристические речные трамваи. — URL: <https://www.vesti.ru/article/3414184> (дата обращения: 23.07.2024).
2. «Яндекс» запустил беспилотное такси в одном из районов Москвы. — URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/07/06/2023/6480446b9a7947c8c046c906 (дата обращения: 23.07.2024).
3. На трассе М-11 «Нева» запустили движение беспилотных грузовиков «Камаз». — URL: <https://tass.ru/ekonomika/18004969> (дата обращения: 23.07.2024).

УДК 531.383

Разработка и исследование МЭМС-датчика курса для мобильного робота-погрузчика

Галкин А.А.^{1,2}, Анчутин С.А.^{1,2}, Кочурина Е.С.^{1,2}, Михеев А.В.¹,
Соломкина Н.А.^{1,2}, Тимошенко А.С.^{1,2}, Тимошенко С.П.²

¹ ООО «Лаборатория Микроприборов»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
agalkin@mp-lab.ru, step305@mail.ru, ekochurina@mp-lab.ru, am@mp-lab.ru,
nsolomkina@mp-lab.ru, at@mp-lab.ru.

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
spt111@mail.ru.

Приведено описание разработанного датчика курса на основе одноосевого МЭМС-датчика угловой скорости, предназначенного для определения ориентации мобильного робота-погрузчика. Дано описание датчика: его структурной схемы и управляющей программы. Представлено описание стенда для калибровки разработанного датчика курса и описание разработанной методики проведения калибровки. Представлена разработанная математическая модель температурной компенсации смещения нуля и масштабного коэффициента датчика курса. Приведены результаты проведенных исследований и полученные параметры разработанного и изготовленного датчика курса.

Ключевые слова: датчик угловой скорости; датчик курса; МЭМС; калибровка; фильтр Калмана.

В работе приведено описание датчика курса на основе одноосевого МЭМС-датчика угловой скорости, предназначенный определения ориентации мобильного робота-погрузчика. Для систем, работающих на открытом пространстве (где есть сигнал ГНСС), для вычисления навигационных данных и ориентации применяют недорогие инерциальные МЭМС-датчики. Поскольку эти датчики обладают невысокой точностью, навигационное решение вычисляется путем объединения показаний датчиков с поправками от ГНСС [1]. Однако в некоторых системах, например, в мобильных роботах-погрузчиках, применяемых в складских помещениях, использование коррекции от ГНСС невозможно. Поскольку использование высокоточных датчиков нецелесообразно из-за их высокой стоимости, в этих случаях применяют МЭМС-датчики, объединяя их показания с доступными внешними корректорами: триангуляция по нескольким источникам радиосигнала, коррекция по видеосигналу и др.

В работе рассматривается разработка и исследование датчика курса на основе одноосевого МЭМС-датчика угловой скорости, а также методы повышения точности определения курсового угла мобильного складского робота-погрузчика.

Основной проблемой при вычислении угла курса является нестабильность смещения нуля и масштабного коэффициента датчика курса, в том числе при изменении температуры. В нормальных условиях эти нестабильности также влияют на точность, однако они имеют более низкий порядок, чем те, которые вызваны изменением температуры. Для того, чтобы компенсировать температурную нестабильность, необходимо задать для датчика эталонные значения углов или угловых



скоростей при различных температурах, после чего сравнить выдаваемые значения с эталоном и ввести поправочные коэффициенты.

Для проведения калибровки и компенсации нестабильностей смещения нуля и масштабного коэффициента датчика курса был собран стенд на базе одноосного поворотного стола и камеры тепла-холода. После вычисления и наложения калибровочных коэффициентов были проведены дополнительные испытания покое, для определения степени компенсации температурной нестабильности смещения нулевого сигнала.

Разработанный программный корректор ошибки на базе фильтра Калмана позволяет производить оценку смещения нуля датчика в реальном времени, что также повышает точность измерений.

По итогам разработки были поставлены эксперименты по оценке скорости накопления ошибки угла курса в различных условиях. Датчик вращался на поворотном столе в НКУ в течение нескольких циклов с чередованием периодов покоя и вращения со скоростью $30^\circ/\text{с}$. Итоги оценки скорости накопления ошибки показаны в табл. 1.

Таблица 1. Накопленная ошибка угла курса при чередовании периодов вращения и покоя

Время непрерывного вращения	5 мин (4 цикла)	10 мин (3 цикла)	20 мин (2 цикла)
Время покоя			
5 с	2,58°	13,1°	7,35°
10 с	7,11°	17,8°	7,33°
30 с	12,5°	12,1°	0,57°
60 с	5,62°	0,07°	5,9°
Скорость накопления ошибки, $^\circ/\text{мин}$.	0,26	0,31	0,12
Средняя скорость накопления ошибки, $^\circ/\text{мин}$.	0,23		

Как видно из таблицы, средняя скорость накопления ошибки угла курса разработанным датчиком составляет $0,23^\circ/\text{мин}$

В работе представлены графики зависимости смещения нуля от температуры для некалиброванного и калиброванного датчика, а также параметры разработанного и изготовленного датчика курса для определения ориентации мобильного робота-погрузчика.

Литература

1. Тимошенко С. П., Кульчицкий А. П. Применение МЭМС — сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов // Известия вузов. Электроника, 2012. — № 6 (98). — С. 51–55.

УДК 004.852

Измерительный комплекс для определения расстояния и азимута источника возбуждения поверхностных сейсмических волн на основе молекулярно-электронных сенсоров

Зайцев Д. Л., Гордеев Я. А., Горчаков И. В.*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

Исследуются явления, связанные с прохождением сейсмических сигналов, вызываемых поверхностными источниками возмущений, распространяющихся исключительно в верхнем слое земной коры при помощи измерительного комплекса для регистрации граничных сейсмических волн на основе молекулярно-электронных датчиков угловых и линейных колебаний. Описан алгоритм классификации источников сигнала, определения расстояния и азимута источника возбуждения поверхностных волн на основе различных методов машинного обучения. Полученные результаты показывают возможность корректной идентификации источника на уровне порядка 80%. При этом алгоритм предполагает использование единственного точечного приемника как при реализации алгоритмов идентификации источника, так и для определения координат источника в полярной системе координат.

Ключевые слова: поверхностные источники; волновое поле; ускорение; скорость; фаза; молекулярная электроника; машинное обучение.

Исследование амплитудных и частотных характеристик сейсмических сигналов, созданных поверхностными источниками

В отличие от относительно интенсивных сейсмических явлений с преобладанием объемных волн, явления, связанные с распространением сейсмических сигналов, вызываемых поверхностными источниками (людьми, животными, транспортными средствами, дождями и др.) плохо изучены. Во всяком случае, они распространяются только в верхнем слое земной коры, амплитуды вызванных ими сейсмических колебаний мала, а амплитудные и частотные характеристики существенно деформируются в результате их распространения сквозь поверхностные неоднородности разных типов [1, 2]. Был разработан и протестирован в лабораторных и полевых условиях прототип измерительного комплекса для проведения экспериментальных исследований сейсмических событий на основе измерения характеристик граничных волн, создаваемых поверхностными источниками с использованием специальных шестикомпонентных датчиков. Каждый датчик в составе измерительного комплекса содержит чувствительные молекулярно-электронные элементы угловых и линейных колебаний и характеризуется селективной способностью регистрировать сдвиговую компоненту волнового поля с высокой чувствительностью [3]. На основе экспериментов впервые удалось получить комплексные и всесторонние исследовательские данные о характере распространения возмущений от поверхностных источников, а также об особенностях распространения волнового сигнала в ближней зоне. В качестве метода определения расстояния до источника сигнала



был выбран метод машинного обучения на основе градиентного бустинга с применением статистических и MFCC характеристик. Модель градиентного бустинга была обучена на тестовых данных на основе выделенных черт. Направление на источник сигнала предсказывалось, с помощью данных, полученных с линейного вертикального датчика и двух ортогональных датчиков вращательных движений. Для этого был использован алгоритм градиентного бустинга, обученный на тех же вариантах набора черт: статистические, MFCC, и их комбинация. Создана база данных, содержащая около 100 наборов экспериментальных шестикомпонентных сейсмограмм, отличающихся типом источника возбуждения (классификация в базе данных проведена по следующим источникам, велосипед, пешеход, автомобиль, фон), а также траекторией перемещения источника. База данных использована для обучения алгоритма и программы идентификации источника и определения его координат, а также для проверки точности разработанных алгоритмов.

На рис. 1 представлен результат работы — проявляющийся в значительном соответствии предсказанных траекторий движений на основе обученных моделей и реальных натурных измерений траектории. В табл. 1, предварительные результаты работы алгоритмов классификации источника.

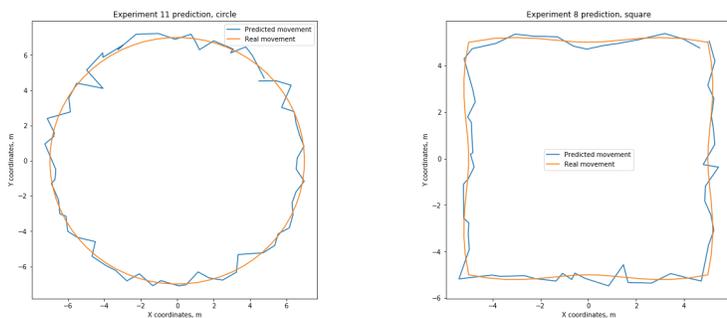


Рис. 1. Предсказание изменения траектории сигнала, проход по окружности и по квадрату вокруг датчика. Синим цветом изображено реальная траектория, оранжевым — предсказанное моделью траектория. По оси x — расстояние в метрах, по оси y — расстояние в метрах

Таблица 1. Точность моделей для классификации пешеход/шум/машина/велосипед

Модель	Пешеход	Шум	Автомобиль	Велосипед
LogisticRegression	0,67213	0,65600	0,58823	0,60162
RandomForest	0,78688	0,752	0,70588	0,65853
XGBoost	0,81147	0,7600	0,6722	0,67479

Заключение

Таким образом, в рамках исследования представлен и экспериментально протестирован 6 компонентный сейсмический измерительный модуль на основе молекулярно-электронных датчиков угловых и линейных перемещений, продемонстрирована

принципиальная работоспособность алгоритмов классификации сейсмического сигнала поверхностных источников, а также показана возможность успешной работы алгоритмов машинного обучения при выявлении направления и расстояния до источника сигнала на основе выделенных из сигнала различных его особенностей.

Литература

1. Пузырев Н. Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию / Под ред. И. Р. Оболенцевой. — Новосибирск: изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. — 301 с.
2. Zhenhua Li and Mirko van der Baan Seismology Elastic passive source localization using rotational motion Geophys // J. Int., 2017. 211. 1206–1222.
3. Агафонов В. М., Афанасьев К. А., Яшкин А. В. Определение направления на движущийся объект с использованием сейсмического модуля, содержащего молекулярно-электронные датчики движения // ТРУДЫ МФТИ, 2013. — Т. 5. — № 2. — С. 142–149.



УДК 534.1

Системное моделирование как методология проектирования Н/МЭМС

Лукин А. В., к. ф.-м. н., Попов И. А., Шуткин Л. В., к. ф.-м. н., Пискун Н. В.,
Удалов П. П.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
lukinalexei@yandex.ru*

Выполнен анализ мирового тренда на разработку, программную реализацию и внедрение в процесс проектирования элементов нано- и микросистемной техники методологии системного моделирования. Особое внимание направлено на обзор современных методов синтеза вычислительно эффективных нелинейных системных моделей пониженного порядка на основе полномасштабных физически связанных моделей проектируемых устройств.

Ключевые слова: нано- и микросистемная техника; нелинейная динамика; редуцированные модели; управление.

Основой расчетного анализа элементов нано- и микросистемной техники являются вычислительные методы механики сплошных сред: методы конечных элементов, конечных объемов, граничных элементов и др. В частности, в области механики деформируемого твердого тела и ряда связанных задач для построения расчетных моделей используются такие программные системы конечно-элементного анализа как ABAQUS, ANSYS, COMSOL, NASTRAN, LS-DYNA и ряд других. В результате конечно-элементной дискретизации модель объекта представляется в виде системы алгебраических или обыкновенных дифференциальных уравнений высокой размерности (до десятков миллионов степеней свободы). Полученные расчетные модели адекватно (точно) характеризуют исследуемый объект, но в силу вычислительной сложности не позволяют оперативно проводить анализ системы в пространстве ключевых параметров и моделировать динамические режимы работы с учетом контуров управления движением, съема и обработки выходных сигналов, что является критически важным при проектировании Н/МЭМС.

В связи с этим, возникает задача построения компактных математических моделей, сохраняющих требуемую степень адекватности реальному объекту. В настоящее время данная задача является предметом интенсивных исследований [1–3]. В англоязычной литературе процесс построения приближенных моделей пониженного порядка носит название «Model Order Reduction» (MOR) и «Reduced Order Modeling» (ROM). Разумеется, идея схематизации сложного объекта его упрощенной математической моделью свойственна любому инженерному расчету. Однако, в обычной практике, так построенная модель лишь качественно описывает сущность протекающих процессов и может быть использована для грубых оценок ключевых параметров. Особенностью современных MOR-алгоритмов является автоматизация процедуры редукции на основе исходной численной модели высокой размерности (конечно-элементной для задач механики твердого тела, конечно-объемной для задач гидродинамики и т. д.) и интеграция построенной компактной модели в процесс системного проектирования механической архитектуры устройства совместно с электроникой.

В докладе представляется обзор и классификация основных групп методов автоматизированного синтеза редуцированных моделей подвижных элементов Н/МЭМС. Отдельное внимание направляется на вопросы применения обсуждаемых численных алгоритмов к физически и геометрически нелинейным задачам динамики чувствительных элементов резонансных нано- и микроэлектромеханических сенсоров (вибрационных и твердотельных волновых гироскопов, резонансных и модально-локализованных акселерометров и гравиметров, датчиков давления с частотным выходом и др.).

Литература

1. Kolchuzhin V. A. Methods and Tools for Parametric Modeling and Simulation of Microsystems based on Finite Element Methods and Order Reduction Technologies [dissertation]. Chemnitz, 2010.
2. Bechtold T. et al. System-level modelling of MEMS. Wiley-VCH, 2013.
3. Benner P. Model Order Reduction. Volume 1, System- and Data-Driven Methods and Algorithms. Berlin, Boston: De Gruyter, 2021.



УДК 681.586.672

Разработка МЭМС-сенсоров на основе тонких мембран для определения параметров газовых сред

Дюжев Н. А.¹, Орешкин Г. И.¹, Денисов В. Е.^{1,2}, Парамонов В. В.¹,
Чиненков М. Ю.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

djuzhev@ckp-miet.ru

² ООО «Фотис»

105005, г. Калуга, пер. Воскресенский, 29, стр. 2, офис 305

В работе приведены результаты исследований конструкции и технологии создания МЭМС-сенсоров: потока газов, давления газов, температуры.

Ключевые слова: МЭМС-сенсор; сенсор давления; датчик давления; сенсор температуры; датчик температуры; сенсор потока газов; датчик потока газов.

Применение микроэлектронных технологий позволяет создавать миниатюрные сенсоры на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) для анализа параметров газовых сред: скорости потока, давления, температуры. Особенностью конструкции данных сенсоров является использование термочувствительных элементов, сигнал с которых зависит от распределения температуры вблизи поверхности чувствительного элемента.

В МЭМС-сенсоре потока газов происходит смещение теплового облака, сформированного нагревательным термоэлементом в зависимости от скорости газа. Возникший градиент температуры приводит к изменению сопротивления термоэлементов и к возникновению разбаланса напряжений на мостовой схеме сенсора. Диапазон измерения скорости потока газа составляет от 0 до 300 л/мин.

В МЭМС-сенсоре давления рабочая область с чувствительным элементом отделена от внешней среды тонкой гибкой диэлектрической мембраной, чувствительной к изменению внешнего давления. Рабочая полость сенсора заполняется инертным газом с минимальной теплопроводностью (азот, аргон, ксенон и др.). При прогибе мембраны возникает градиент температуры в рабочей области чувствительного элемента и, соответственно, разбаланс напряжений на мостовой схеме сенсора. Для обеспечения высокой чувствительности датчика к изменению внешнего давления в качестве материала нагревателя и термопар в полости датчика применяется силнолегированный поликремний. Диапазон измерения давления 0,01–120 кПа.

МЭМС-сенсор датчика температуры представляет собой двумерную матрицу термочувствительных элементов. Каждый термочувствительный элемент содержит площадку из поглощающего ИК-излучение слоя нитрида кремния, посредством теплопередачи происходит разогрев поликремниевых термопар, что определяет эффект температурного детектирования датчика. Диапазон измерения температуры от 25 до 45 °С, точность измерения температуры составляет 0,1 °С.

В ходе проведенных работ изготовлены экспериментальные образцы МЭМС-сенсоров, на которых были проведены исследования функциональных характеристик. Результаты исследований показали возможность создания датчиков на их основе.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ
(ГК № 075-15-2021-1350 от 05.10.2021, вн. номер 15.SIN.21.0004)
с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ.*

УДК 621.3.049

Применение струйной микропечати для формирования чувствительных элементов полупроводниковых газовых сенсоров на основе оксидов металлов

Сагитова А. С.^{1,2}, Николаева А. В.¹, Поломошнов С. А.^{1,3}, Амеличев В. В.¹, Кривецкий В. В.^{1,2}

¹ НПК «Технологический центр»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7
vkrivetsky@inorg.chem.msu.ru

² Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова
119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработаны подходы к получению суспензий ультрадисперсных материалов на основе полупроводниковых оксидов металлов в различных дисперсионных средах. Показано использование данных суспензий в создании чувствительных слоев газовых сенсоров, оценена повторяемость их функциональных характеристик.

Ключевые слова: полупроводник; оксиды металлов; газовые сенсоры; струйная микропечать; суспензия; воспроизводимость.

Воспроизводимость характеристик металлоксидных полупроводниковых газовых сенсоров в ходе производства от партии к партии имеет определяющее значение для практического применения устройств на их основе в различных новых областях, подразумевающих использование моделей сенсорного отклика на базе подходов машинного обучения [1]. Другими важными требованиями к технологии изготовления сенсоров и, в частности, технологии формирования чувствительного слоя, являются малые потери материала, возможность работы с материалами сложного химического состава и морфологии, в том числе нанокompозитами, а также возможность производства малых серий сенсоров с конкурентными стоимостными характеристиками. Немаловажной является и морфология конечного материала, которая должна обеспечивать разветвленную систему пор для эффективного химического взаимодействия с газовой средой. Применяемые в полупроводниковой промышленности методы вакуумного напыления не позволяют реализовать комплекс данных требований.

Одним из альтернативных решений, относящимся к группе активно развиваемых в настоящее время аддитивных технологий, является метод струйной печати материалов из суспензий [2, 3]. Развитие данного подхода формирования функциональных структур на основе ультрадисперсных полупроводниковых материалов на сегодняшний день призвано решить несколько проблем — в первую очередь проблему получения слоев материалов с воспроизводимой геометрией, лишенной эффекта так называемого «кофейного пятна», заключающегося в концентрировании материала у краев области печати по мере высыхания дисперсионной среды. Другими техническими задачами являются подбор концентрации суспензии, достижение необходимой вязкости, поверхностного натяжения и смачиваемости



поверхности, обеспечивающими как бесперебойную печать, так и однородность получаемой в результате печати структуры. Летучесть дисперсионной среды, оказывающая влияние на скорость формирования печатаемой структуры, также оказывает существенное влияние на конечный результат.

В ходе данной работы был получен ряд суспензий ультрадисперсных материалов на основе нанокристаллических диоксидов олова (SnO_2) и титана (TiO_2) с применением эфиров и ацетатов этиленгликоля в качестве дисперсионных сред. Полученные суспензии использовались для формирования чувствительных слоев газовых сенсоров на поверхности микро-нагревательных элементов на базе кремниевых микроэлектромеханических структур (МЭМС). Формирование чувствительных элементов осуществлялось как методом послойного нанесения на всю область печати, так и методом последовательного заполнения области печати латерально примыкающими элементами.

Продемонстрированы параметры газовой чувствительности изготовленных сенсоров, в том числе величина сенсорного отклика по отношению к набору газов, а также стабильность характеристик в ходе длительной непрерывной работы и воспроизводимость параметров сенсоров от образца к образцу. Показана перспективность подхода струйной микропечати ультрадисперсных материалов латеральными примыкающими элементами для формирования чувствительных элементов сенсоров с высокой повторяемостью характеристик.

Литература

1. Robin Y., Amann J., Goodarzi P., Schneider T. et al. Deep Learning Based Calibration Time Reduction for MOS Gas Sensors with Transfer Learning // *Atmosphere*, 2022. 13(10). P. 1614.
2. Amelichev V. V., Generalov S. S., Nikolaeva A. V., Polomoshnov S. A. et al. Study of the Sensitivity of Porous SnO_2 -Based Thick-Film Elements to the Hydrogen Concentration in Air // *Semiconductors*, 2021. 55(13). P. 1063–1066.
3. Andreev M., Kovalev V., Amelichev V., Generalov S. et al. Synthesis of ultrafine tin dioxide by flame spray pyrolysis for inkjet printing of sensitive elements of gas sensors // *Nanoindustry*, 2020. 13(5). P. 276–283.

УДК 621.3

Разработка технологии создания и исследование сорбционных свойств микрофлюидных газохроматографических колонок на кремниевых подложках**Платонов И. А.¹, Платонов В. И.¹, Агафонов А. Н.¹, Андреев Т. А.¹, Миланина К. И.¹, Дюжев Н. А.², Лазаренко И. П.², Чиченков М. Ю.², Парамонов В. В.²**

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва
443086, г. Самара, Московское ш., 34
rovvv@yandex.ru

² Центр коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

В работе представлена технология создания микрофлюидных газохроматографических колонок на плоскости кремниевых подложек с длиной канала 1 м и сечением канала 150×240 мкм. Канал формировался методом плазмохимического травления, герметизация канала проводилась при помощи анодного бондинга. Представлены результаты моделирования и экспериментального изучения газодинамических характеристик изготовленной колонки, показано, что результаты математического моделирования отличаются от экспериментальных данных менее чем на 1%, что делает возможным использование построенной модели для расчетов оптимального расположения пиляров внутри микрофлюидного канала, в целях получения максимальной загрузочной емкости и эффективности изготавливаемой газохроматографической колонки. Также представлена хроматограмма разделения алифатических углеводородов, показано, что соединения C₆–C₈ разделяются менее чем за 60 сек.

Ключевые слова: газохроматографическая колонка; МЭМС; микротехнологические системы; газодинамические характеристики.



УДК 621.37

МЭМС-переключатели для передовых систем радиолокации и связи

Уваров И. В., к. ф. - м. н.

Ярославский филиал Физико-технологического института

имени К. А. Валиева РАН

150067, г. Ярославль, ул. Университетская, 21

i.v.uvarov@bk.ru

Широкому применению МЭМС-переключателей в радиоэлектронике препятствуют их недостаточно высокие рабочие характеристики. В докладе представлены перспективные МЭМС-ключи с электростатическим управлением. Описаны методы снижения напряжения срабатывания, защиты от залипания и увеличения контактной силы.

Ключевые слова: МЭМС; переключатель; электростатический актуатор; напряжение срабатывания; контактное усилие; залипание.

В последние десятилетия наблюдается тенденция к миниатюризации радиоэлектронных устройств. Этой тенденции способствует растущий интерес к беспилотной технике, в особенности к летательным аппаратам. Уменьшение габаритов и энергопотребления мобильных радиолокационных комплексов и систем связи достигается за счет использования передовых электронных компонентов, в том числе СВЧ-переключателей. Большие перспективы имеют ключи, изготовленные по технологии МЭМС [1]. Малый размер, низкое энергопотребление и высокое быстродействие сочетаются в них с малыми вносимыми потерями и высокой изоляцией. МЭМС-переключатели разрабатываются на протяжении нескольких десятилетий, но до сих пор не нашли широкого применения по причине недостаточно высоких рабочих характеристик. Они используют актуаторы различных типов, среди которых наиболее подходящим считается электростатический актуатор. Наряду с множеством достоинств, он имеет недостатки в виде высокого управляющего напряжения, подверженности залипанию и малой развиваемой силы, приводящей к высокому контактному сопротивлению. В работе описаны методы преодоления этих недостатков и представлены переключатели на основе актуаторов с улучшенными рабочими характеристиками.

Стандартный МЭМС-переключатель имеет подвижный электрод в форме кантилевера, под которым располагаются управляющий и коммутируемый электроды. Эффективным методом снижения напряжения срабатывания такого ключа является увеличение отношения длины кантилевера к толщине за счет уменьшения толщины до нанометровых значений. Актуатор со сверхвысоким отношением, достигающим 400, обладает напряжением срабатывания 12,5 В, что в несколько раз меньше рабочего напряжения типовых изделий. Еще более низкое значение 4,9 В достигается в переключателе с подвижным электродом в форме балки, закрепленной на торсионных подвесах (рис. 1). Наличие управляющих электродов под обоими плечами балки позволяет создавать дополнительную размыкающую силу, защищающую ключ от залипания [2].

Силу прижима контактов обычно увеличивают за счет усложнения формы и увеличения размеров электродов. В то же время, конструкция на основе

кантилевера более удобна для встраивания в линию передач, устойчива к перепадам температур и механическим напряжениям, а также обладает меньшим временем срабатывания и паразитной емкостью. В целях увеличения силы прижима разработана методика проектирования, заключающаяся в последовательном подборе высоты контактного выступа, величины зазора и толщины кантилевера, а также параллельного соединения нескольких кантилеверов и изменения числа и положения выступов [3]. Методика также учитывает размыкающую силу, напряжение срабатывания и коллапса и другие характеристики, необходимые для надежного функционирования ключа. С использованием методики создан компактный переключатель на основе алюминиевого кантилевера длиной 50 мкм (рис. 2). Сила прижима, приходящаяся на один контакт, составляет 169 мкН и с запасом превосходит порог в 100 мкН, необходимый для достижения низкого и стабильного контактного сопротивления.

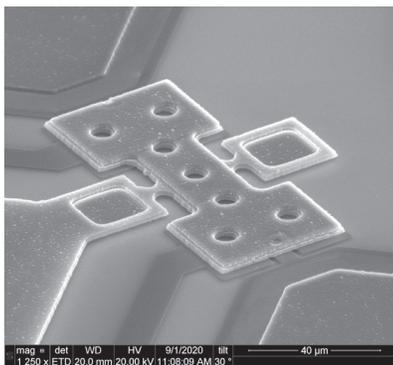


Рис. 1. МЭМС-переключатель с механизмом активного размыкания

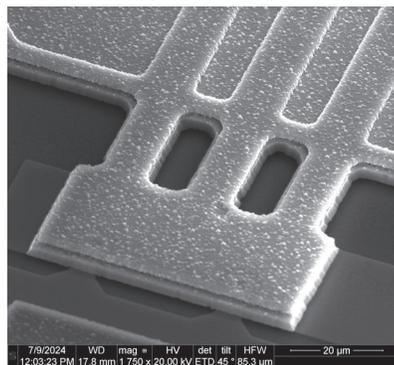


Рис. 2. МЭМС-переключатель с увеличенной силой прижима контактов

Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН по теме № FFNN-2022-0017 при финансовой поддержке грантов Фонда содействия инновациям № 91354 и № 91740.

Литература

1. Kurmendra A. S. MEMS switch realities: addressing challenges and pioneering solutions // *Micromachines*, 2024. Vol. 15. 556 p.
2. Уваров И. В., Абрамычев А. М. МЭМС-переключатель с контактами из платины и рутения // *Наноиндустрия*, 2023. — Т. 16. — № 9S-2. — С. 313–315.
3. Uvarov I. V., Belozero I. A. Design guideline for a cantilever-type MEMS switch with high contact force // *Micro*, 2024. Vol. 4. P. 1–13.



УДК 681.785.42

Фотометрическая матрица на основе фотозарядного эффекта

к. ф. -м. н. Курчанов А. Ф., Харламов П. Г.

ФГУП «ВНИИФТРИ»

141570, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)

kurchanov@vniiftri.ru, harlamov@vniiftri.ru

На основе малоизвестного фотозарядного эффекта разработан макет фотометрической матрицы, причем пиксели изображения передаются от фокальной плоскости к объемной 3D компоновке приемных преобразователей пучком оптических волокон. Фотозарядный эффект обладает высокой устойчивостью к перегрузкам мощными оптическими импульсами.

Ключевые слова: фотоэффект; фотозарядный эффект; оптический импульс; энергия; мощность; интенсивность.

На сегодняшний день видеокamеры, фотоаппараты и одиночные приемники излучения строятся на основе фотоэффекта, при использовании которого фототок пропорционален поглощаемой мощности излучения. Одиночные и образующие приемную матрицу фотодиоды могут иметь различную спектральную чувствительность и работать, например, в диапазоне от 200 до 1200 нм (кремниевый), от 400 до 1800 нм (германиевый), а также 3–5 мкм и 8–12 мкм (кадмий-ртуть теллур (КРТ) [1]). При этом германиевые и кремниевые фотодиоды работают при комнатной температуре, а сплавы КРТ требуют охлаждения до 77 К (до 293 К для диапазона 1,5–2,5 мкм). Создание болометрических матриц современного типа, на основе оксида ванадия и аморфного кремния позволило создать матрицы вначале 16×16, а затем и 640×480 элементов. В этом случае не используется фотоэффект. Другим типом фотоприемника без использования фотоэффекта является приемник на основе фотозарядного эффекта [2], возникающего только при изменении освещенности и не проявляющегося в статике. Особенностью фотозарядного эффекта, преобразующего радиоимпульс (модулированное по амплитуде излучение) в видеоимпульс с амплитудой, пропорциональной квадратному корню от мощности излучения является широкий спектральный и динамический диапазон. Так, несущая частота радиоимпульса может лежать в ультрафиолетовой, видимой, инфракрасной и даже радиочастотной области [3]. Динамический диапазон проявления эффекта проверялся на интервале 6 с половиной порядков по энергии световых импульсов. При доступных для кустарного ручного изготовления приемниках пикселей размером 10×10×10 мм и подаче в них излучения пластиковым оптоволоконным диаметром 0,5 мм матрица их 400 пикселей 20×20 имеет размер в фокальной плоскости объектива 10×10 мм, а суммарный объем приемников пикселей 400 см³ в итоге не превышает 1 литр (с учетом необходимых зазоров и места для электроники). Такая конструкция представляется интересной в качестве первоначального макета для изучения особенностей работы фотометрической матрицы на основе фотозарядного эффекта. Необходимая модуляция света осуществляется при этом обтюратором. На следующем шаге видится возможным уменьшение элементарных приемников до размера 2×2×2 мм за счет отказа от использования корпусных радиоэлементов, в этом случае суммарный объем приемников снизится до 3,2 см³ для матрицы с 400 пикселями и можно попытаться перейти к матрицам со значительно

большим количеством рабочих пикселей. На настоящем этапе изготовлена линейка из 16 пикселей, входящая в матрицу 20×20 как ее рабочая часть (с остальными не подключенными к приемникам световодами). Фотозарядный эффект обладает прекрасной воспроизводимостью, следовательно фотометрическая матрица на основе использующих его приемников обладает, в том числе, и метрологическими свойствами, а потому разработка продукции на ее основе [4] требует изучения составляющих погрешности, влияния возможных действующих факторов и изучения свойств надежности. Разумеется, измерительная камера на основе такой матрицы обладает и существенным недостатком, а именно — низкой чувствительностью. Однако, при высокой яркости наблюдаемых объектов это может не иметь существенного значения, а стойкость к перегрузкам импульсами света может оказаться важной.

Литература

1. Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Акимов В. М., Климанов Е. А., Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Мансветов Н. Г., Пономаренко В. П., Тимофеев А. А., Филачёв А. М. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // Физика и техника полупроводников, 2005. — Т. 39. — Вып. 10. — С. 1257–1265.
2. Курчанов А. Ф., Епихина Г. Е., Ефреев З. Л., Фаенов А. Я. Наблюдение фотоэлектрического эффекта при воздействии лазерного излучения на металлы и полупроводники // Квантовая электроника, 1988. — Т. 15. — № 4. — С. 720–725.
3. Ivanov O., Kuneva M. Quality Control Methods Based on Electromagnetic Field-Matter Interactions // Applications and Experiences of Quality Control. Georgi Nadjakov Institute of Solid State Physics, 2011. P. 509–536.
4. Храпов Ф. И., Панков А. А. Анализ нормативных документов, регламентирующих планирование работ по метрологическому обеспечению разработки продукции // Альманах современной метрологии, 2022. — Т. 3. — № 31. — С. 94–105.



УДК 621

Дискретизация изображения малоразмерных объектов матричным микроболометрическим детектором

Хафизов Р. З., Серов В. В., Скрипачева Л. В., Соколов К. В.

АО «ОКБ «Астрон»

140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1

Рассмотрены особенности дискретизации изображения малоразмерных объектов в фокальной плоскости оптико-электронного канала с фотоприемным устройством (ФПУ) на основе микроболометрического матричного детектора. Представлены результаты анализа трансформации характеристик воспроизведения кружка рассеяния объектива (КРО) при изменении его положения относительно массива чувствительных областей детектора с шагом пикселей $\delta_{\text{px}} = 17$ мкм с учетом топологии чувствительных областей, преобразующих тепловое излучение. Цель работы состояла в определении характеристик обнаружения тепловых объектов с малыми угловыми размерами при использовании оптико-электронного канала с микроболометрическим ФПУ.

Ключевые слова: ИК-излучение; микроболометрические детекторы; фотоприемное устройство (ФПУ); оптико-электронный канал; функция рассеяния точки (ФРТ).

При тепловой регистрации объектов, удаленных на значительное расстояние, их изображение в фокальной плоскости матричного детектора представляет собой кружок рассеяния, размеры которого зависят от оптических параметров объектива. Относительное пространственное изменение мощности излучения в плоскости детектора описывается функцией рассеяния точки (ФРТ). Дискретизация изображения матричным детектором, нарушая пространственную инвариантность преобразования ФРТ, оказывает существенное влияние на характеристики воспроизведения кружка рассеяния объектива (КРО) при изменении его положения относительно массива чувствительных областей детектора. При этом существенное влияние на эти характеристики оказывает топология чувствительных элементов детектора.

В работе проведен анализ характеристик обнаружения тепловых объектов, в котором за функцию рассеяния точки фокальной плоскости объектива принято гауссово распределение интенсивности ИК-излучения в со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 5$ мкм (радиус кружка рассеяния $r = 2\sigma = 10$ мкм). Указанное приближение соответствует расчетной функции концентрации энергии ИК-объектива ОЗЛ-100 (АО «ОКБ «Астрон») с фокусным расстоянием 100 мм (F/1,0), оптимизированного на спектральный диапазон 8–12 мкм с коэффициентом пропускания $k = 75$ %.

На рис. 1 представлена топология матричного детектора с шагом пикселей 17 мкм и чувствительными элементами площадью 11×14 мкм², нормированных на величину σ . Относительные изменения мощности излучения при смещении кружка рассеяния по ортогональным осям на величины x_0, y_0 в окрестности центра пиксела определяют пеленгационную характеристику матрицы:

$$\gamma(x_0, y_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-1,1}^{+1,1} \int_{-1,4}^{+1,4} \exp - \frac{(x + x_0)^2 + (y + y_0)^2}{2} dx dy. \quad (1)$$

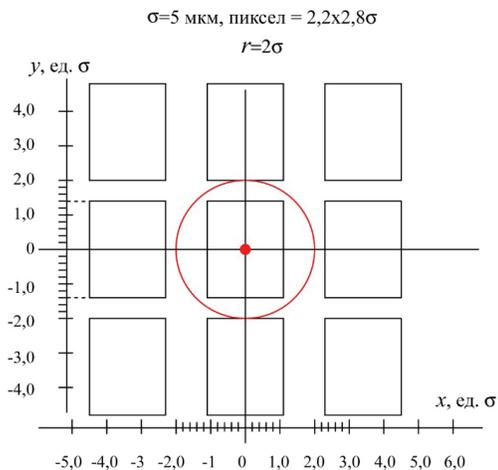


Рис. 1. Нормировка размеров пиксела и кружка рассеяния на величину σ

Выражение (1) симметрично относительно сдвигов по осям на величину шага элементов, поэтому достаточно проанализировать изменение сигнала в окрестности центра пиксела при сдвигах по x в пределах $x_0 = -1,1 \dots 1,1$ и по y в пределах $y_0 = -1,4 \dots 1,4$.

3D-график относительных изменений значения мощности излучения на пикселе в зависимости от произвольного положения кружка рассеяния объектива в плоскости матрицы, полученный численным интегрированием выражения (1), представлен на рис. 2. Здесь сечения А, В, и С дают пеленгационные характеристики матрицы при движении кружка рассеяния от центра пиксела, соответственно, вдоль осей x , y и по диагонали пиксела.

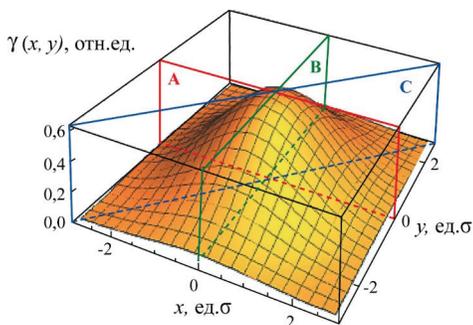


Рис. 2. 3D-представление отклика матрицы на движение кружка рассеяния относительно центра пиксела

На основе полученных данных выявлены вероятности обнаружения мало-размерных объектов, обусловленные дискретностью чувствительных элементов матричного детектора. Проведена оценка предельной дальности их обнаружения.



УДК 621.3.049.76

Технология производства многоуровневых микросистем с торцевой коммутацией на основе органических подложек и бескорпусных микросхем

Вертянов Д. В.¹, Беляков И. А.¹, Жумагали Р. Н.¹, Соловьев И. А.¹,
Сидоренко В. Н.²

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

² АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
vdv.vertyanov@gmail.com, vitaly@microsborka.ru

В работе представлены результаты разработки технологии объемной интеграции элементов ЭКБ на примере создания макета 3D микросистемы цифровой части ЛЧМ-радары ближней зоны. Приведена методология проектирования конструкции микросистемы с торцевой коммутацией и результаты исследований макетов.

Ключевые слова: система в корпусе; микросистема; трехмерная интеграция; торцевая коммутация; органическая подложка; корпусирование.

Введение

Большинство трехмерных микросборок представляют собой многоуровневые структуры, роль уровней в которых выполняют коммутационные платы, корпуса интегральных схем или отдельные бескорпусные кристаллы. Эти платы, корпуса и кристаллы содержат различные элементы и компоненты, соединенные в рамках каждого из уровней проводящими дорожками и переходными отверстиями. Между собой уровни соединяются вертикальной коммутацией, которая может быть реализована множеством различных способов. Один из таких способов — торцевые проводники, объединенные в единую проводящую структуру с дорожками в плоскости уровней. Такой подход имеет два основных преимущества перед другими вариантами вертикальных соединений [1].

Первое преимущество — топологические нормы торцевой вертикальной коммутации, такие как ширина и зазор между дорожками, не зависят от высоты сборки в отличие, например, от вертикальной коммутации, реализованной посредством TSV или TMV. В последних двух случаях минимальный диаметр отверстия зависит от толщины подложки, потому имеет место ограничение по толщине уровней микросборки.

Второе преимущество торцевой коммутации состоит в том, что металлизация вертикальных соединений наращивается непосредственно на выходящие к торцам контакты уровней, формируя однородные электрические соединения без использования процессов сварки и пайки [2].

Объект разработки

В работе представлены результаты разработки технологии изготовления трехмерных, многоуровневых микросборок с торцевой коммутацией, обеспечивающей возможность интеграции в одном изделии широкого спектра активных полупроводниковых и пассивных компонентов различных геометрических размеров, более

эффективный отвод тепла, быстрдействие при сниженных затратах на производство.

Это достигается за счет применения модульного принципа, который заключается в создании унифицированных уровней в виде коммутационных подложек с элементами и компонентами, имеющих согласующиеся друг с другом периферийные выводы для вертикальной коммутации. Нижняя коммутационная подложка играет роль основания изделия, объединяя все сигналы вышележащих уровней и обеспечивая монтаж на плату и быстрый функциональный контроль. Вертикальные соединения, расположенные по торцам, позволяют задействовать под коммутацию между уровнями боковые стенки изделия, не создавая при этом ограничений для внедрения других типов вертикальной коммутации и обеспечивая за счет большей однородности структуры микросборки снижение уровня термомеханических нагрузок, уменьшение паразитных сопротивлений, индуктивностей и емкостей. Проводники на боковых гранях микросборки хорошо поддаются контролю и могут быть сформированы на сборках любой высоты без привязки к аспектному соотношению между нормами вертикальной коммутации и толщиной уровня. Герметизация сборки осуществляется компаундом с малым температурным коэффициентом линейного расширения и высокой теплопроводностью, играющим одновременно роль диэлектрика, герметика и конструкционного элемента и размещения межуровневой коммутации, создаваемой по бессварочной и безопасной технологии на боковых сторонах микросборки методом химического и электрохимического осаждения проводящего металла непосредственно на поверхность компаунда, без использования вакуумных процессов формирования адгезионных слоев металлизации.

Методология проектирования

При проектировании микросборок помимо частных, имеют место и более общие проблемы, связанные с тем, что многие САПР электроники не адаптированы для создания многоуровневых трехмерных структур, особенно если речь идет о структурах с торцевой коммутацией и встроенными компонентами. Это объясняется тем, что большую часть своих возможностей разработчики систем автоматизированного проектирования тратят на совершенствование более стандартных и востребованных инструментов.

В работе представлено обоснование выбора САПР Xpedition Enterprise (Siemens EDA) и методология проектирования с учетом особенностей конструкции микросборок с торцевыми проводниками и функциональными возможностями программного обеспечения.

Результаты

По разработанной технологии был спроектирован и изготовлен макет цифровой части ЛЧМ-радар (рис. 1), который содержит 4 функциональных уровня: уровня управления, уровня интерфейса, уровня преобразователей сигналов и уровня преобразователей питания. При разработке удалось достичь следующих характеристик макета: общее количество слоев — 20, минимальный зазор между проводниками составляет 20 мкм, минимальная ширина проводящей дорожки 50 мкм, минимальный размер переходного отверстия 50 мкм, минимальный зазор между дорожками и сами дорожки на торцах — 150 мкм, количество выводов — 253, объем микросборки 6,8 см³, масса — 18,9 г.

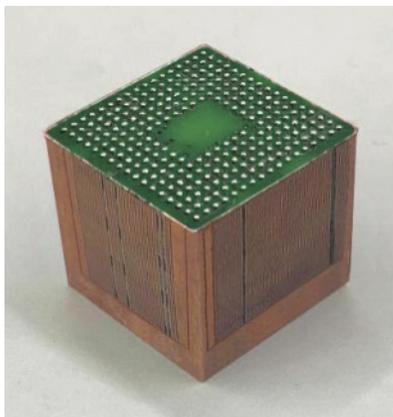


Рис. 1. Изображение макета цифровой части ЛЧМ-радара ближней зоны

Заключение

На примере макета микросистемы цифровой части ЛЧМ-радара ближней зоны показаны этапы разработки и преимущества технологии изготовления многоуровневых микросистем с торцевой коммутацией на основе органических подложек и бескорпусных микросхем. За счет оригинальных подходов в проектировании и использования новых конструктивно-технологических решений удалось снизить комплексный массогабаритный показатель (произведение массы и объема) относительно исходного 2D исполнения изделия с корпусными микросхемами примерно в 15 раз.

Работа проводилась в рамках финансовой поддержки Минобрнауки в рамках государственного проекта FSMR-2022-002.

Литература

1. Беляков И. А., Вертянов Д. В., Кочергин М. Д., Тимошенков С. П. Особенности проектирования и технологии изготовления трехмерной микросистемы с торцевой коммутацией // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2023. — Т. 28. — № 4. — С. 471–488.
2. Liu M. et al. A novel 3D packaging technology for high-reliability applications // 2023 24th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). IEEE, 2023. P. 1–4.

УДК 621.3

Микросхемы АЦП и ЦАП производства АО «Ангстрем» и перспективы новых разработок

Трудновская Е. А., Горюнов С. В., Гамарц И. А., Сладков М. В.

АО «Ангстрем»

122460, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 2, стр. 3

diamond@angstrom.ru

Рассмотрены особенности схемотехнической и конструктивной реализации изготовления микросхем аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) производства АО «Ангстрем» и перспективы новых разработок.

Ключевые слова: АЦП; ЦАП; устройство выборки-хранения (УВХ); источник опорного напряжения (ИОН); регистр последовательного приближения (РПП).

1. АО «Ангстрем» разработало и серийно выпускает ряд АЦП.

1.1. 12-разрядный АЦП последовательного приближения с параллельным и последовательным интерфейсом выдачи данных 5023НВ04А5 с входным напряжением по аналоговым входам $U_{IA} = \pm 5 \text{ В}, \pm 10 \text{ В}$, являющийся функциональным аналогом АЦП AD7892-1 фирмы ANALOG DEVICES и 12-разрядный АЦП последовательного приближения с параллельным и последовательным интерфейсом выдачи данных 5023НВ04В5 с входным напряжением по аналоговым входам $U_{IA} = \pm 15 \text{ В}$.

Микросхемы 5023НВ04А5/В5 разработаны по алгоритму последовательного приближения в максимальной конфигурации входящих в него блоков (УВХ, генератор, ИОН, ОУ1, ОУ2, компаратор, РПП, ЦАП на основе матрицы R-2R, последовательный и параллельный интерфейс выдачи данных) для работы с временем преобразования данных 2,2 мкс и с временем выборки УВХ 350–400 нс. Это позволяет АЦП работать с частотой преобразования до 400 тыс. отсчетов в секунду при параллельном интерфейсе выдачи данных, а при последовательном интерфейсе выдачи данных при тактовой частоте 20 МГц.

Микросхемы изготавливаются по интегральной БиКМОП-технологии с проектными нормами 2 мкм. АО «Ангстрем» продолжает работы по расширению серии микросхем 5023НВ04 с входным напряжением $U_{IA} = 0...2,5 \text{ В}$ (аналог AD7892-2) и $U_{IA} = \pm 2,5 \text{ В}$ (аналог AD7892-3), и микросхему функционального аналога AD7893 с использованием типового технологического процесса для данной серии.

1.2. 14-разрядный АЦП 5023НВ015 последовательного приближения на основе емкостного ЦАП с последовательным интерфейсом выдачи данных, с входным напряжением по аналоговым входам $U_{IA} = (0...U_{REF}) \text{ В}$, $U_{IA} = (\pm U_{REF}/2) \text{ В}$, являющийся функциональным аналогом АЦП AD7851 фирмы ANALOG DEVICES, работает с временем преобразования 3,25 мкс, содержит УВХ, ИОН, систему калибровки и ряд интерфейсов, таких как 8051, SPI, QSPI, позволяющих передавать данные в последовательном коде. Опорное напряжение V_{REF} может быть задано с помощью внешнего источника ИОН, в пределах от 2,5 В до V_{CC} . Главной особенностью микросхемы 5023НВ015, является самокалибровка при включении питания, которая обеспечивает необходимую точность параметров АЦП.

Микросхемы изготавливаются по интегральной КМОП-технологии с проектными нормами 1,2 мкм.



2. АО «Ангстрем» разработало и серийно выпускает ряд новых ЦАП, способных успешно заменить популярные импортные микросхемы.

Новая серия отечественных микросхем не уступает импортным функциональным аналогам по характеристикам, а по параметрам стойкости к экстремальным факторам окружающей среды существенно их превосходит.

2.1. Микросхемы 5023HA024, 5023HA025, 8-ми разрядный ЦАП с параллельным входным интерфейсом и токовым выходом являющиеся функциональным аналогом DAC0808 (National Semiconductor) и MC1508 (Philips Semiconductors). Время установления выходного тока полной шкалы 360 нс. Предназначен для преобразования 8-ми разрядного прямого двоичного кода на цифровых входах ТТЛ и КМОП уровней в ток на аналоговом выходе, который пропорционален значениям входного кода и (или) опорного тока.

В состав ЦАП входят: прецизионная резистивная матрица типа R-2R, усилители — инверторы для управления токовыми ключами, токовые ключи, выполненные на биполярных транзисторах. Усилитель опорного тока, блок режимного тока. Преобразование происходит по принципу суммирования двоично-взвешенных токов. Относительная погрешность преобразования во всем диапазоне не хуже $\pm 0,19\%$.

2.2. Микросхемы ЦАП 5023HA03A4, 5023HA03B4, 5023HA04A4, 5023HA04B4, 5023HA03A5, 5023HA03B5, 5023HA04A5, 5023HA04B5 представляют собой 4-канальные 12-разрядные ЦАП с параллельным входным интерфейсом и с выходом по напряжению, работающие в расширенном диапазоне питающих напряжений. Микросхемы выполнены в однокристалльном исполнении и содержат входной и выходной регистры, схему управления, преобразователь уровня, матрицу резисторов R-2R, а также выходной буферный усилитель для каждого канала ЦАП.

В ЦАП предусмотрена возможность обратного считывания данных из входных регистров. Данные в ЦАП подаются в виде двоичного кода. Микросхемы со сбросом в середину шкалы 5023HA03A4, 5023HA03B4, 5023HA03A5, 5023HA03B5 (код 0x800), являются функциональным аналогом DAC8412, фирма Analog Devices. Микросхемы со сбросом в ноль шкалы 5023HA04A4, 5023HA04B4, 5023HA04A5, 5023HA04B5 (код 0x000), являются функциональным аналогом DAC8413, фирма Analog Devices. ЦАП способны работать в широком спектре питающих и опорных напряжений. Работа в двухполярном режиме с напряжением питания от ± 5 до ± 15 В и опорным напряжением от $\pm 2,5$ до ± 10 В, напряжение питания логической части 5 В. Особенностью ИС является возможность работы от одного источника питания 5 В.

3. Микросхемы серии 5023 АО «Ангстрем» выпускает в металлокерамических корпусах.

Микросхемы АЦП являются важным «мостом» между аналоговой и цифровой частью многих устройств в том числе при преобразовании аналогового сигнала снятого с микромеханического датчика в цифровой. ЦАП являются важным «мостом» между цифровой и аналоговой частью многих устройств и могут выступать связующим звеном между ЭВМ и объектом управления в системах автоматического управления, быть генератором аналогового сигнала.

Указанные проекты позволяют обеспечить более высокую точность, производительность и надежность работы электронных систем, функционирующих в условиях воздействия радиации, уменьшить массогабаритные показатели.

УДК 621.3.049.772.1.002

Исследование и оптимизация технологии формирования микронагревателя газового сенсора на основе платиныНиколаева А. В.¹, Поломошнов С. А.^{1,3}, Амеличев В. В.¹, Кривецкий В. В.^{1,2}, Григорьев Д. М.¹¹ НПК «Технологический центр»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

A.Nikolaeva@tcen.ru, S.Polomoshnov@tcen.ru

² Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Представлены результаты экспериментальных работ по исследованию и оптимизации процесса формирования пленки Ti–Pt со стабильным значением температурного коэффициента сопротивления, минимальными внутренними механическими напряжениями и дефектностью поверхности для МЭМС микронагревателей.

Ключевые слова: полупроводниковый датчик газа; микроэлектромеханическая система; микронагреватель; внутренние механические напряжения; платина; температурный коэффициент сопротивления.

Развитие методов машинного обучения, обработки данных, а также повышение доступности вычислительных мощностей делают возможной коммерциализацию устройств машинного обоняния на основе полупроводниковых газовых сенсоров в новых прикладных областях — персонализированной медицины и медицинской диагностики, экологического мониторинга, промышленной и продовольственной безопасности и др. [1]. В связи с этим крайне востребованными оказываются газовые сенсоры на основе малогабаритных кремниевых микроэлектромеханических структур (МЭМС) с нагревателем, обладающие, помимо малых энергопотребления и тепловой инерции, высокой воспроизводимостью характеристик и низкой стоимостью. Ключевым требованием, предъявляемым к таким микронагревателям, является долговременная стабильность характеристик при работе в диапазоне температур от 200 до 500 °С. Это предъявляет к материалам микронагревателей требования высокой прочности и химической стойкости, близости температурных коэффициентов расширения элементов мембраны, нагревателя, чувствительного слоя и т. д. [2, 3].

Авторами изготовлен макетный образец тонкопленочного нагревателя из платины (t с адгезионным подслоем из титана Ti топология которого выполнена в форме круглого симметричного меандра на диэлектрической мембране.

Для изготовления макетного образца оптимизировался технологический процесс магнетронного напыления адгезионного подслоя Ti и напыления пленки Pt методом электронно-лучевого испарения с последующим стабилизирующим термическим отжигом в едином вакуумном цикле. Требования к пленке Ti–Pt: поверхностное сопротивление 0,6 Ом/кв; толщина адгезионного подслоя Ti 25 нм; минимальная дефектность поверхности. Основное техническое



требование — стабильное значение температурного коэффициента изменения удельного сопротивления пленки в рабочем диапазоне температур (ТКС).

Пленка Ti–Pt осаждалась на диэлектрический подслоя, формируемый путем окисления кремния при высокой температуре с последующим осаждением нитрида кремния. Далее проводился процесс напыления пленки Ti–Pt в вакуумной установке: магнетронным напылением подслоя Ti толщиной 25 нм и методом электронно-лучевого испарения 450 нм слой Pt. Параметры разрабатываемого процесса напыления оптимизировались для минимизации внутренних механических напряжений, приводящих к деформации и к нарушению адгезии пленки, а так же для стабилизации ТКС в рабочем диапазоне температур.

Установлено, что увеличение толщины пленки Ti, снижение скорости напыления Pt и добавление в единый вакуумный цикл постнапылительного отжига при температуре 400 °С, стабилизировали ТКС пленки и обеспечили оптимальный уровень внутренних механических напряжений. Наблюдаемая дефектность поверхности обусловлена диффузией Ti в объем пленки вплоть до границы Pt с внешней средой и образованием оксида Ti [4, 5]. На свойства пленки влияет среда, в которой проводится стабилизирующий отжиг [6]. Отжиг в N₂ увеличивает адгезию и улучшает морфологию поверхности пленки, а так же стабилизирует ТКС. В разрабатываемой технологии для стабилизации пленки применяются 2 процесса отжига: постнапылительный отжиг при 400 °С в лабораторной установке и отжиг в N₂ при 600 °С.

РЭМ изображения поперечного сечения пленки Ti–Pt показали, что применение двух отжигов минимизирует процессы диффузии Ti и уменьшает поверхностную дефектность пленки Ti–Pt. Так же установлено, что полученная пленка обладала стабильным ТКС равным $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в рабочем диапазоне температур, что обеспечивает ее использование в качестве материала интегральных микронагревателей в современных миниатюрных газовых датчиках.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-19-00703. Работа проводилась с использованием оборудования центра коллективного пользования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр».

Литература

1. Altawell N. I — Background, materials, and process // Introduction to Machine Olfaction Devices // Academic Press, 2022. P. 1–26. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822420-5.00003-9>.
2. Baroncini M., Placidi P., Cardinali G. C., Scorzoni A. Thermal characterization of a microheater for micromachined gas sensors // Sensors and Actuators A: Physical, 2004. Vol. 115 (1). P. 8–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2004.03.012>.
3. Поломошнов С. А. Конструктивно-технологический базис термомикросистем с малой потребляемой мощностью: дис. ... кандидата технических наук: 05.27.01. — Москва, 2005. — 163 с.
4. Schmid U., Seidel H. Effect of high temperature annealing on the electrical performance of titanium/platinum thin films // Thin Solid Films, 2008. Vol. 516 (6). P. 898–906. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.04.128>.

5. Ababneh A., Al-Omari A. N., Dagamseh A. M. K. et al. Electrical and morphological characterization of platinum thin-films with various adhesion layers for high temperature applications // *Microsyst Technolgies*, 2017. Vol. 516 (6). P. 898–906. URL: <https://doi.org/10.1007/s00542-015-2715-0>.
6. Olowolafe J. O., Jones R. E. Jr., Campbell A. C., Hegde R. I., Mogab C. J., Gregory R. B. Effects of anneal ambients and Pt thickness on Pt/Ti and Pt/Ti/TiN interfacial reactions // *Applied Physics*, 1993. Vol. 73 (4). P. 1764–1772. URL: <https://doi.org/10.1063/1.353212>.



УДК 53.087

Идентификация жидких веществ схожего химического состава с применением метода машинного обучения

Воронова Н. В.¹, к. ф.-м. н., Шамин Е. С.¹, Тельминов О. А.¹, к. т. н.,
Горнев Е. С.¹, чл.-корр. РАН, д. т. н., Анисимкин В. И.², д. ф.-м. н.

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

navoronova@niime.ru

Разработана методика обработки большого массива откликов акустических волн Лэмба в жидкостных датчиках, позволяющая идентифицировать жидкости с близким химическим составом и электрической проводимостью. Методика основана на измерении амплитуд мод Лэмба нулевого и высших порядков с помощью мультисенсорной системы [1], и обработки результатов измерений с помощью метода полярных гистограмм и метода главных компонент (РСА) [2].

Ключевые слова: волны Лэмба; датчики жидкости; анализ большого массива данных; минеральные воды.

Мультисенсорные системы для анализа жидких сред, широко известные в мировой научной литературе, как «электронные языки» или «сенсоры вкуса», представляют уже сложившуюся и быстро развивающуюся область прикладной науки — сенсорики [3]. Мультисенсорная система представляет собой массив перекрестно-чувствительных акустических сенсоров, дающих различную информацию о физических параметрах анализируемой жидкости. Данные от такого массива информации обрабатываются с помощью методов машинного обучения. Если сенсорная система корректно спроектирована и откалибрована, то она способна давать не только традиционную аналитическую информацию о жидкости, но и обеспечивает идентификацию многокомпонентных смесей [4] без каких-либо дополнительных сведений об их составе.

Апробация методики выполнялась с использованием 33 акустических мод на примере 8 минеральных вод, взятых из разных источников городов Северного Кавказа. Показано (рис. 1), что несмотря на близость химического состава площади гистограмм S для разных вод отличаются более, чем на порядок. Также отличаются гистограммы отдельных жидкостей, полученные с интервалом в 1 месяц: процесс «старения» вещества зафиксирован на уровне нескольких десятков процентов, причем может сказываться как на уменьшении, так и на увеличении площади гистограммы S .

Методика применима для оперативной отбраковки лекарственных средств и пищевых продуктов, определения примесей в питьевой воде, а также определения соответствия тестируемой жидкости заданному стандарту.

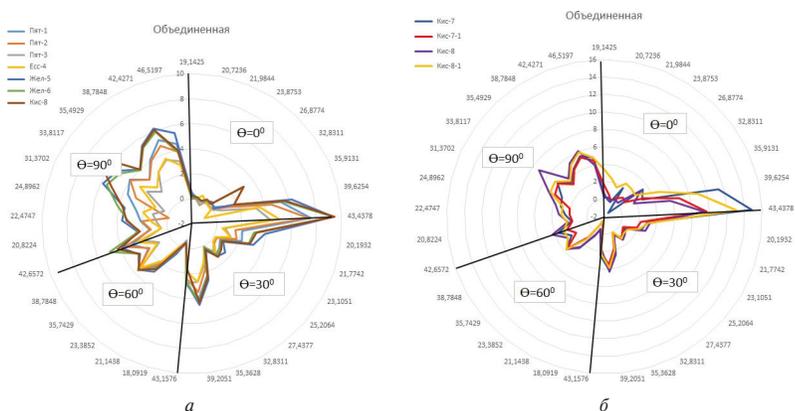


Рис. 1. Гистограммы минеральных вод близкого химического состава:
 а) воды разного сорта, измеренные сразу после взятия пробы;
 б) воды двух сортов, протестированные с интервалом в 1 месяц

Литература

1. Smirnov A., Anisimkin V., Voronova N. V. et al. Multimode Design and Piezoelectric Substrate Anisotropy Use to Improve Performance of Acoustic Liquid Sensors // *Sensors*, 2022. Vol. 22. № 19. P. 7231. DOI: 10.3390/s22197231. EDN DHZUVB.
2. Жевненко Д. А., Мещанинов Ф. П., Кожевников В. С. и др. Методы машинного обучения для задач разработки элементной базы // *Российский форум микроэлектроника 2023: Сборник тезисов 9-й Научной конференции, (ФТ Сириус, 09—14 октября 2023 г.)*. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. — С. 586—588. EDN SFZJUS.
3. Легин А. В., Кирсанов Д. О. Мультисенсорные системы для анализа жидких сред // *Сенсорное слияние: Сборник докладов II Всероссийского конгресса по сенсорному приборостроению, Кронштадт, 30—31 мая 2017 года*. — Кронштадт: Центральный научно-исследовательский институт управления, экономики и информации Росатома, 2017. — С. 34—48. EDN EXSEVG.
4. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*, 2017. — № 4 (168). — С. 16—41. EDN ZUQSZZ.



УДК 621.3.049

Технология формирования резистивной маски с высоким аспектным соотношением

Платонов Д. Д.¹, Юркин Н. О.¹, Ткаченко А. В.¹, Лысенко И. Е.^{1,2}, д. т. н.,
Фролова А. О.¹

¹ ООО «Мэппер»

109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, к. 5

daniil.platonov@mapperllc.ru

² УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Разработана технология формирования и переноса изображения периодической структуры с критическим размером 250 нм и аспектным соотношением фоторезистивной маски 1:4 при разрешающей способности установки проекционной фотолитографии 275 нм. Разработан шаг вскрытия резистивной маски для обеспечения высокой равномерности плазмохимического травления.

Ключевые слова: МЭМС; фотолитография; плазмохимическое травление; фоторезист.

В настоящее время технологическая норма <250 нм является крайне востребованной для производства микроэлектромеханических (МЭМС) устройств, однако препятствием для формирования данных топологий являются операции фотолитографии, требующие перехода на дорогостоящие установки фотолитографии с KrF лазерами, а также подходящие к ним фоторезисты.

В компании ООО «Мэппер» используются маски с заведомо большим критическим размером (critical dimension, CD), не превышающие разрешающую способность установки фотолитографии. Важной особенностью является использование фоторезиста с толщиной не менее 900 нм. Верно подобрав параметры экспонирования, удалось добиться минимальной остаточной толщины фоторезиста на дне топологии в 30 нм, при этом разброс остаточной толщины по пластине составляет приблизительно 5%. Для переноса топологии на нижележащий слой SiO_x разработан двухэтапный процесс травления, обработка которого уменьшила CD на менее чем 5% от исходного.

Разработанная технология формирования и переноса изображения периодической структуры позволяет: уменьшить затраты на производство с топологиями <300 нм; формировать топологии с CD меньше разрешающей способности установки; получение топологий в фоторезисте с аспектным соотношением 1:4.

УДК 666.1.001.5

Разработка технологии обработки стекла для создания устройств микросистемной техники

Баклыков Д. А.^{1,2}, Стукалова В. Е.², Соловьев А. А.^{1,2}, Курочкина Ю. А.²,
Пильник И. С.², Родионов И. А.^{1,2}

¹ Научно-исследовательский институт автоматики им. Духова
127030, г. Москва, ул. Суцневская, 22

² НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1
irodionov@bmstu.ru

В работе представлена взаимосвязь выходных характеристик и параметров жидкостного травления. Показаны технологические возможности и особенности при подборе раствора и создания защитной маски. Разработан маршрутно-технологический процесс, обеспечивающий возможность создания ступенчатого профиля в стекле.

Ключевые слова: МЭМС; жидкостное травление; кварцевое стекло; боросиликатное стекло; раствор плавиковой кислоты; буферные растворы; корпусирование; анодный бондинг.

В устройствах микросистемной техники кварцевое и боросиликатное стекло играют ключевую роль [1]. С помощью обработки боросиликатного стекла можно корпусировать изделия, создавать электрическую развязку, а также микрофлюидные устройства [2–3]. В свою очередь, использование плавленного кварца для микро-механических, микрофлюидных и оптических приборов обусловлено стабильными механическими, химическими, изоляционными свойствами. Конструктивные элементы содержат упругие мембраны толщиной 5–50 мкм, микроканалы глубиной 10–100 мкм, сквозные отверстия на всю глубину подложки от 150 мкм до 1000 мкм или комбинацию таких структур.

Жидкостное травление стекла является эффективным методом обработки, позволяющим формировать глубокие структуры с изотропным профилем и малой шероховатостью при высоких скоростях травления (несколько мкм/мин), однако процесс проводится в растворах плавиковой кислоты (HF) ввиду высокой химической инертности стекла [1, 4–5]. Использование буферных добавок (рис. 1) в растворах плавиковой кислоты способствует стабилизации скорости травления (в частности, для травления многокомпонентных стекол за счет растворения продуктов реакции). Главным технологическим ограничением жидкостного травления является поддержание стойкости защитной маски в течение всего процесса.

Таким образом, в работе представлена разработка технологии травления кварцевого и боросиликатного стекла на 100 мм пластинах на базе растворов плавиковой кислоты, обеспечивая скорость травления более 3 мкм/мин и изотропность не хуже $1,1 \pm 0,1$, для создания устройств микросистемной техники.

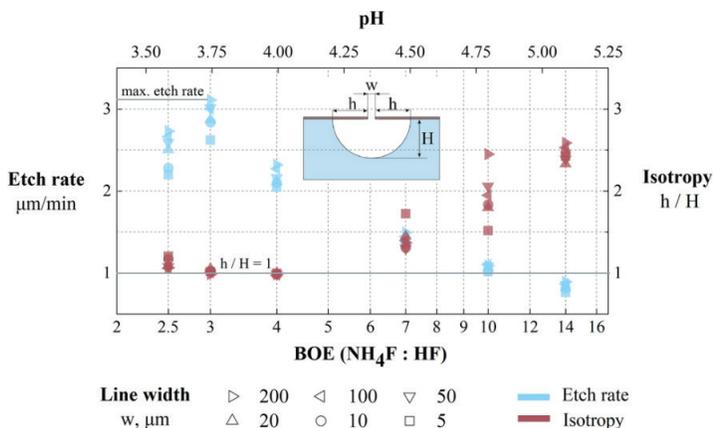


Рис. 1. Влияние раствора на характеристики травления кварцевого стекла

Литература

1. Konstantinova T. G. et al. Deep multilevel wet etching of fused silica glass microstructures in BOE solution // *Scientific Reports*, 2023. Vol. 13. № 1. P. 5228.
2. Ryzhkov V. V. et al. Cyclic on-chip bacteria separation and pre-concentration // *Scientific Reports*, 2020. Vol. 10. № 1. P. 21107.
3. Kharlamov M. S., Guseva O. S., Konovalov S. F. Features of the application of reactive ion etching of quartz in the production of pendulums of Q-Flex accelerometers // *Russian Microelectronics*, 2020. Vol. 49. P. 184–194.
4. Iliescu C., Tay E. H. F. Wet etching of glass for MEMS applications // *ROMJIST*, 2006. Vol. 9. № 4. P. 285–310.
5. Park H. et al. A review of wet chemical etching of glasses in hydrofluoric acid-based solution for thin film silicon solar cell application // *Current Photovoltaic Research*, 2017. Vol. 5. № 3. P. 75–82.

УДК 621.372.63

Промышленное применение атомно-силовой микроскопии в производстве ПАВ-фильтров

Литун Я. Б., д. т. н. Сеницына Т. В., к. т. н. Груздев А. С.

ООО «БУТИС»

109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5

Разработана методика контроля формы электродов ВШП методом АСМ для достижения целевых частотных характеристик ПАВ фильтров, максимально приближенных к результатам моделирования. Приведены в сравнении расчетные и экспериментальные АЧХ ПАВ-фильтров, изготовленных при разных режимах экспонирования. Показано влияние формы электродов ВШП на частотные характеристики ПАВ-фильтра.

Ключевые слова: ПАВ-фильтры; АСМ; безмассовая литография; контактная литография; проекционная литография.

Основными функциональными элементами акустоэлектронных фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ-фильтры) являются встречно-штыревые преобразователи (ВШП), сформированные методом однослойной фотолитографии (безмасковая, контактная или проекционная литография) на поверхности пьезоэлектрической пластины определенной кристаллической ориентации. Принцип действия современных ПАВ-фильтров, предназначенных для частотной селекции сигналов в системах навигации и связи, основан на эффекте отражения волны в электродных структурах ВШП, уровень которого определяется геометрией электродов [1, 2].

Для СВЧ-фильтров диапазона частот от 1 до 4 ГГц топологические размеры электродов ВШП варьируются от 200 до 800 нм. В микроэлектронике соблюдение таких размеров не является сложной задачей. Однако в технике ПАВ важно контролировать не только соблюдение полученных топологических размеров электродов ВШП проектным нормам, но и их форму, а также однородность распределения толщины металлизации, как в единичном элементе топологии, так и по всей пластине с точностью 1 нм.

Основным видом неразрушающего контроля, используемого в ООО «БУТИС», является атомно-силовая микроскопия (АСМ) основанная на принципе Ван-дер-Ваальсового межмолекулярного взаимодействия, которая позволяет проводить измерение топологических размеров как диэлектрических, так и проводящих материалов с субмикронным разрешением. Полученные результаты измерений позволяют установить четкое соответствие формы рабочих характеристик ПАВ-фильтров от реализованной геометрии электродов ВШП в зависимости от особенностей использованного технологического процесса, а именно, от типа литографии и режимов экспонирования. В качестве примера на рис. 1 приведено АСМ сечение электродов ВШП при экспонировании с дозами 130 и 220 Дж/см², а на рис. 2 — соответствующие им амплитудно-частотные характеристики (АЧХ).

Из сравнения данных рис. 1 и 2 видно, что любое отклонение геометрии электрода от прямоугольной формы, которая обычно используется при моделировании, приводит к изменению АЧХ, что связано с изменением массовой нагрузки электрода на поверхность пьезоэлектрика и его сопротивления. Как показали

исследования, наиболее близкую к прямоугольной форму электрода обеспечивает безмасковая литография.

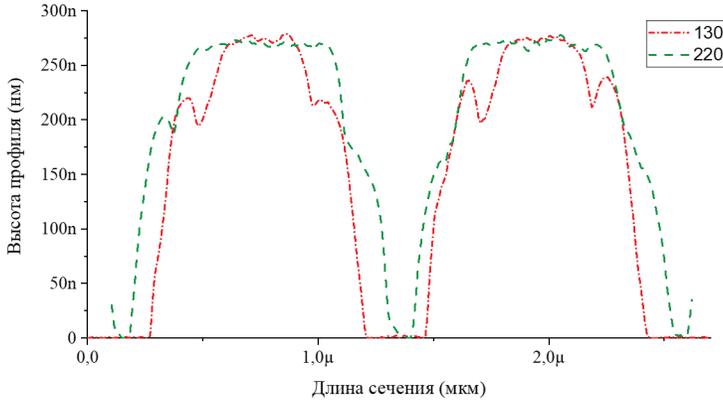


Рис. 1. Сечение формы штыря ВШП для разных доз экспонирования

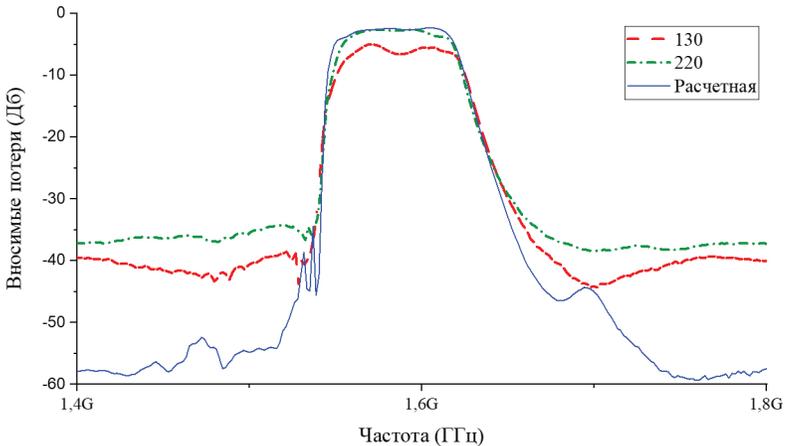


Рис. 2. АЧХ ПАВ-фильтра для разных доз экспонирования

Таким образом, применение АСМ при производстве ПАВ-фильтров позволяет оптимизировать технологию изготовления конкретного изделия, и как следствие, повышает экономическую рентабельность и конкурентоспособность изготавливаемых ПАВ-фильтров.

Работа выполнена в рамках комплексного проекта № 020-11-2022-1150 от 16.11.2022 г.

Литература

1. Сеницына Т. В., Багдасарян А. С., Бутенко В. В., Данилов А. Л., Иванов П. Г. Синтез фильтров на ПАВ для систем связи, радиолокационной и телекоммуникационной аппаратуры // *Электросвязь*, 2016. — № 11. — С. 81–86.
2. Сеницына Т. В. Методы математического моделирования высокоизбирательных фильтров на поверхностных акустических волнах с малым вносимым затуханием // *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2019. — Т. 24. — № 2. — С. 20–30.



УДК 539.232 + 621.315.592.4

Плазмохимический синтез тонких пленок IGZO

Телегин С. В., Сафронова С. С., Слаповская Е. А., Мочалов Л. А.

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23*

Разработана методика плазмохимического синтеза тонких пленок IGZO. Определены оптимальные условия осаждения, исследована морфология и элементный состав. Продемонстрированы возможности метода плазмохимического синтеза для создания материалов, используемых в качестве газочувствительных сенсоров NOx.

Ключевые слова: PECVD; IGZO; газочувствительные сенсоры NOx.

Постоянно растущая индустриализация и использование ископаемых видов топлива приводят к увеличению содержания загрязнений в атмосфере. Электростанции, предприятия и автомобили загрязняют окружающий воздух вредными газами: оксидами углерода, сероводородом, диоксидом серы и оксидами азота (NOx). Кроме парникового эффекта и кислотных дождей, загрязнение воздуха оксидами азота NOx оказывает серьезный вред здоровью человека. В ходе недавних медицинских исследований установлено, что контакт с высокими концентрациями NO₂ (>100 ppm) приводит к значительным повреждениям органов дыхания (горла и легких) и зрения, вызывая катаракту [1]. Поэтому необходимы высокочувствительные и селективные сенсоры для мониторинга и определения NOx на открытом воздухе и в помещениях. Наиболее перспективными газовыми сенсорами являются полупроводниковые на основе оксидов металлов. Таким материалом является оксид индия-галлия-цинка (IGZO) [2].

Целью данной работы является определение оптимальных условий плазмохимического осаждения и исследование морфологии поверхности и элементного состава полученных тонких пленок IGZO для создания газочувствительного сенсора NOx.

Тонкие пленки системы IGZO были впервые получены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) на подложках из высокочистого полированного с-сапфира. В качестве источников макрокомпонентов были использованы металлический высокочистый галлий, высокочистый индий и высокочистый цинк. Низкотемпературная неравновесной плазма индуктивного-связанного ВЧ (40,68 МГц) разряда при пониженном давлении (0,1 Торр) инициировала химические превращения между исходными веществами. В качестве плазмообразующего газа использована смесь аргона, водорода, кислорода или паров воды. Фотография поверхности и элементный состав образца IGZO, полученные на сканирующем электронном микроскопе JSM-IT300LV (JEOL) с рентгеновским микроанализом (детектор X-MaxN 20 (Oxford Instruments)) представлены на рис. 1.

Таким образом, плазмохимический синтез является наиболее перспективным методом получения тонких пленок системы IGZO, благодаря высокой скорости осаждения, возможности равномерного осаждения на большие площади, низкой температуре осаждения и высокому качеству получаемых пленки.

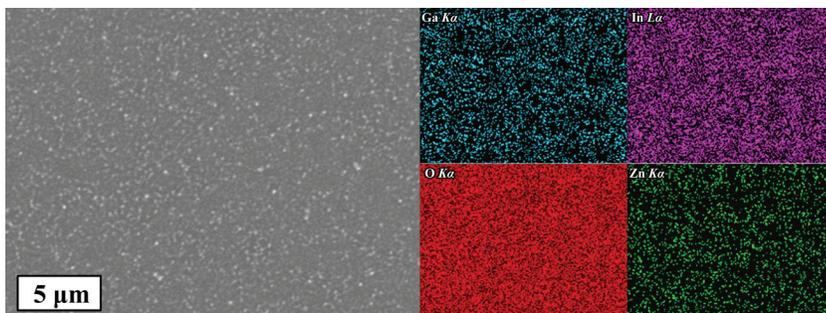


Рис. 1. СЭМ фотография поверхности и карты распределения элементов для образца IGZO

*Исследования выполнены с использованием инфраструктуры
Учебного дизайн-центра электроники ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
созданного в рамках реализации федерального проекта
«Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности».
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-00053
«Разработка научных основ технологии получения хеморезистивных материалов для
электронного нося на основе сложных наноструктурированных оксидных матриц».*

Литература

1. Schraufnagel D. E., Balmes J., Cowl C. T., Matteis S. et al. Air pollution and non-communicable diseases: A review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee // *Chest*, 2018. Vol. 155. P. 417–426.
2. Eadi S. B., H.J, Shin, Kumar P. S., Song K. W. et al. Fluorine-implanted indium-gallium-zinc oxide (IGZO) chemiresistor sensor for high-response NO₂ detection // *Chemosphere*, 2021. Vol. 284. P. 131287.



УДК 53.082.743

Разработка микроэлектронных сенсоров на основе магниторезистивных тонкопленочных структур

Дюжев Н. А., Орешкин Г. И., Парамонов В. В., Чиненков М. Ю., Демин Г. Д.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
chinenkov@inbox.ru

В рамках работы рассмотрены технологические аспекты и режимы получения магниторезистивных пленок с повышенной чувствительностью. На основе изготовленных магниторезистивных структур исследованы макеты микроэлектронных сенсоров с четной и нечетной функциональной характеристикой, которые предназначены для создания сенсоров магнитного поля и угла поворота. **Ключевые слова:** магниторезистивный эффект; магниторезистор; сенсор магнитного поля; датчик магнитного поля; датчик угла поворота.

Магниторезистивные сенсоры, принцип действия которых основан на изменении сопротивления в тонких ферромагнитных пленках под действием магнитного поля, обладают рядом достоинств среди большого числа сенсоров-магнитометров, а именно: высокая чувствительность к магнитному полю; малые габариты; малое энергопотребление; нечувствительность к механическим воздействиям; возможность работы в широком диапазоне температур. На мировом рынке сенсорики задачи создания магниторезистивных сенсоров решаются такими фирмами, как Philips, Honeywell, Bosh и др. Отечественные производители на рынке отсутствуют, что ставит нашу промышленность в зависимость от зарубежных поставок. Основным компонентом магнитных сенсоров является ферромагнитная тонкая пленка (FeNi, FeNiCo, CoFeV и др.) толщиной 40–50 нм, которая формируется методом магнетронного осаждения на кремниевые подложки. Магниторезистивные сенсоры, как и другие изделия микроэлектроники, состоят не только из ферромагнитных слоев. Для успешного функционирования необходимо использовать контактные, пассивирующие, адгезионные слои. В рамках работы рассмотрены технологические аспекты и режимы получения магниторезистивных пленок с повышенной чувствительностью. Для определения оптимальной температуры осаждения получена зависимость величины АМР-эффекта и коэрцитивной силы от температуры подложки в процессе осаждения. Определены оптимальные режимы травления интегральных структур с магниторезисторами.

Управляя топологией, можно получить сенсор с четной или нечетной характеристикой: сенсор магнитного поля или сенсор угла поворота. На основании полученных магнитных пленок был разработан сенсор магнитного поля. чувствительность которого составила 9,4 (мВ/В)/(кА/м). Для обеспечения высокого уровня выходных характеристик сенсоров магнитного поля необходимо улучшить магнитные свойства магниторезистивного материала, в частности, максимально увеличить магниторезистивный эффект, определяющий амплитуду выходного сигнала и, при этом, не допустить сильного роста коэрцитивной силы и поля анизотропии для достижения минимального гистерезиса.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ
(ГК № 075-15-2021-1350 от 05.10.2021, вв. номер 15.SIN.21.0004)
с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ.*

УДК 621.3.049

Технологии проектирования и производства корпусов для микросборок и инерционных МЭМС-датчиков

Нагаев Н. А.*АО «Завод полупроводниковых приборов»
424003, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26
nanaev@zpp12.ru*

Рассмотрены тенденции развития микроэлектроники. Сформулированы требования к металлокерамическим корпусам для микросборок и вариант исполнения корпуса для инерционных МЭМС-датчиков. Раскрыт опыт отечественного предприятия по проектированию современных металлокерамических корпусов.

Ключевые слова: металлокерамический корпус; микросхема; микросборка; МЭМС.

Закрытие зарубежных рынков для российских потребителей и активное развитие отечественных микроэлектронных производств привело к дефициту сложнфункциональных модулей. Наработки по этому направлению, имевшиеся у отечественных предприятий, потребовали резкого масштабирования.

В статье рассматриваются некоторые тенденции, которые будут определять облик металлокерамических корпусов для микросборок, датчиков и отечественной микроэлектроники в целом в ближайшем будущем:

1. Предварительное моделирование изделий микроэлектроники при помощи специализированных САПР. Построение и испытание математических моделей изделий.

САПР позволяют повысить скорость и качество разработки металлокерамических корпусов для изделий микроэлектроники.

2. Изменение норм проектирования металлокерамических корпусов.

Тенденция к уменьшению ширины проводников от 50 мкм, диаметров межслоевых коммутационных отверстий до 70 мкм, толщины керамических слоев до 100 мкм. Это позволяет закладывать в корпуса микросборок относительно небольшого размера плотную топологию и обеспечивать большую функциональность.

3. Улучшение свойств и составов существующих материалов, или разработка новых составов материалов, применяемых как для производства металлокерамических корпусов, так и вспомогательных.

Задача уплотнения топологического рисунка металлокерамического корпуса связана с применением новых улучшенных материалов. В первую очередь — порошков вольфрама.

4. Эволюция конструктивных решений корпусов и подложек для микросборок.

Микросборки обычно реализуют одну определенную функцию. Использование этих изделий в микроэлектронной аппаратуре позволяет уменьшить ее объем и массу в несколько раз по сравнению с аппаратурой на интегральных схемах широкого применения с использованием печатных плат. Существуют различные конструктивные решения для микросборок и способов их герметизации.



5. Решения по компоновке корпусов на примере корпуса для инерционных МЭМС-датчиков.

Впервые в России разработана конструкция металлокерамического корпуса с выводами типа J с присвоением подтипа 45 по ГОСТ Р 54844-2011.

Параллельно с рассмотрением основных тенденций развития микроэлектроники, которые предъявляют требования к конструкциям и технологии производства металлокерамических корпусов, проведен анализ состояния разработок отечественного предприятия. Сделан вывод о том, что процесс развития отечественного производителя металлокерамических корпусов идет в соответствии с мировыми тенденциями.

УДК 621.3

Накопительные детекторы ионизирующего излучения**Федоренко В. В., Яшин В. С.***ООО «Софт Эксперт»**141595, г. Солнечногорск, д. Ложки, тер. «Индустриальный парк «Есипово»,**стр. 17А/2, пом. 19**expert@softexp-rf.ru*

В докладе рассматривается изменение электрических характеристик полупроводниковых структур. Pin диода, МОП-транзистора под действием ионизирующих излучений, ТЗЧ, протонного и космического излучения. Исследован процесс (восстановления) фединга характеристик со временем в период 365 дней. На основе данных структур исследованы возможности использования в качестве накопительных детекторов для контроля общей дозы на персонал и аппаратуру. Исследованы температурные кривые ВАХ. Предлагаются технические решения для измерительной схемы и ее аппаратная реализация. Разработаны сборки детекторов на основе гибридной технологии.

Ключевые слова: Pin диод; МОП-структура; ионизирующее излучение; флюэнс; доза; дозовая нагрузка.

Изменения свойств МОП и PIN структур под действием ионизирующего излучения была замечена рядом исследователей. В связи с этим предпринимались попытки применения МОР и Pin структур в качестве нейтронного детектора и детекторов гамма излучения.

В ходе исследования структур были получены достаточно противоречивые результаты. При более тщательном исследовании результатов было отмечено, что определяющим фактором является схема включения и толщина структур. «Тонкие» и «толстые» структуры имеют различный отклик на действие как гамма так и нейтронного излучения.

Для проверки возможности использования Pin структуры в качестве нейтронного детектора был изготовлен детектор, имеющий практически кубическую структуру с размером 1×1×1,2 мм. При этом отклик данной структуры оказался хорошо воспроизводимым, и имеет линейную зависимость прямого напряжения открытия перехода от полученной дозы нейтронного излучения. Для примера представлены характеристики зависимости изменения напряжения на Pin структуре от поглощенной дозы нейтронного излучения спектр деления.

Для изучения возможности использования МОП-структуры был разработан кольцевой МОП-транзистор. Дозовые характеристики МОП-транзистора зависят от типа структуры и имеют различные характеристики.

Испытания проведены на экспериментальной базе 12 ЦНИИ МО РФ, и на орбите МКС в течении года.

Литература

1. Holmes-Siedle A. G The space charge dosimeter — general principles of a new method of radiation dosimetry // Nucl. Instrum. and Methods, 1974. Vol. 121. P. 169–179.
2. Rosenfeld A. B. MOSFET dosimetry on modern radiation oncology modalities // Radiation Protection Dosimetry, 2002. Vol. 101. P. 393–398.



3. Asensio L.J., Carvajal M.A., Lopez-Villanueva J.A. et al. Evaluation of low-cost commercial MOSFET as radiation dosimeter // *Sensors and Actuators*, 2006. Vol. A125. P. 288–295.
4. Kwan I.S., Rosenfeld A.B., Qi Z. Y et al. Skin dosimetry with new MOSFET detectors // *Radiation Measurements*, 2008. Vol. 43. P. 929–932.
5. Перевертайло В.Л. Создание элементной базы для ядер-но-физического и радиационного приборостроения на основе кремниевой интегральной технологии // Тр. 5-й Междунар. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса, 2004. — С. 200.

УДК 533.924

Исследование влияния геометрических параметров подвижной структуры на процесс плазмохимического травления инерциальных МЭМС

Каранин Н. С.*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»**197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30**karanin.ns@gmail.com*

Разработан метод определения минимально необходимой толщины защитной маски для плазмохимического травления приборного слоя массива чувствительных элементов инерциальных микроэлектромеханических систем. Исследована скорость травления защитной маски в процессе травления приборного слоя микроэлектромеханических акселерометров.

Ключевые слова: скорость травления; селективность травления; плазмохимическое травление; глубокое реактивно-ионное травление; МЭМС-акселерометр.

Плазмохимическое травление по технологии Bosch-процесса [1] является распространенным способом изготовления различных чувствительных слоев при производстве МЭМС. Наиболее значимым слоем в инерциальных МЭМС, таких как акселерометры и гироскопы, является приборный, в котором формируют подвижную структуру. Основными элементами подвижной структуры являются инерциальная масса и упругий подвес, размеры которых влияют на выходные характеристики изделий.

Плазмохимическое травление осуществляют через защитную маску, формируемую фотолитографией и травлением диоксида кремния. Важным является определение минимально необходимой толщины защитной маски для проведения процесса плазмохимического травления приборного слоя. Сложность заключается в том, что скорость травления защитной маски зависит от температуры поверхности [2] элементов приборного слоя инерциальных МЭМС. Для создания метода определения минимально необходимой толщины защитной маски было изучено влияние геометрических параметров подвижной структуры на скорость травления защитной маски. С помощью лазерной интерферометрии была исследована скорость травления защитной маски в процесс плазмохимического травления приборного слоя микроэлектромеханических акселерометров двух типов.

Данные работы выполнены на кристалльном производстве АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в рамках работ по совершенствованию процесса плазмохимического травления приборного слоя микромеханических акселерометров с аспектным соотношением 30:1 и минимальным размером элемента, равным 2 мкм.

Литература

1. Teo A. J. T., Li H., Say Hwa Tan and Yong-Jin Yoon. An optical MEMS accelerometer fabricated using double-sided deep reactive ion etching on silicon-on-insulator wafer // IOP Publishing Ltd Journal of Micromechanics and Microengineering, 2017. P. 8.
2. Kerstena H., Deutscha H., Steffena H., Kroesenb G. M. W., Hipplera R. The energy balance at substrate surfaces during plasma processing // Vacuum, 2001. P. 385–431.



УДК 621.3.049.76

Применение лазерной и плазмохимической обработки поверхности полиимида для повышения адгезии металла к диэлектрику в слоях перераспределения

Кочергин М. Д., Соловьев И. А., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Рассмотрено несколько режимов обработки поверхности полиимида с помощью лазерного ИК-излучения и воздействия плазмохимической обработки. Методом отрыва измерена величина адгезии меди к полиимидной пленке на исследуемых образцах.

Ключевые слова: RDL; лазерная обработка; плазмохимическая обработка; повышение адгезии.

Миниатюризация электронных приборов ведет к появлению кристаллов со все большим количеством контактных площадок и все большей плотностью размещения контактов. Для подобных кристаллов, даже если монтаж методом разварки возможен, он требует огромного количества времени и ведет к значительному увеличению площади, занимаемой смонтированным кристаллом. Решить данные проблемы способны технологии рассредоточенного корпусирования на уровне пластины, позволяющие корпусировать кристаллы с минимальным на сегодняшний день шагом контактных площадок и любым материалом контактных площадок [1].

Наиболее значимыми операциями в технологиях рассредоточенного корпусирования являются операции формирования коммутационных слоев перераспределения. Медная коммутация должна обладать хорошей адгезией к диэлектрику, при этом толщина ее должна быть достаточно велика для передачи требуемых сигналов и одновременно достаточно мала для возможности монтажа современных кристаллов, расстояние между контактными площадками которых может быть менее 10 мкм. Помимо этого, коммутационные слои в процессе изготовления подвергаются воздействию температур до 250 °С, при которых они должны сохранять стабильность размеров [2, 3].

Термомеханические напряжения являются серьезной проблемой для технологий рассредоточенного корпусирования на уровне пластины, и с ростом количества слоев коммутации и с увеличением толщины коммутационных дорожек, а также диэлектрика проблемы термомеханической стабильности слоев перераспределения становятся все более актуальными. Чтобы термическая деформация оказывала менее разрушительное влияние на слои перераспределения, необходимо улучшить адгезию между материалами корпуса. Наиболее распространенный материал диэлектрика коммутационных слоев — полиимид. Однако полиимид без модификаций имеет низкую адгезию к гладкой поверхности кремния и нанесенных на кремний защитных диэлектриков, а также низкую адгезию к меди [4, 5].

В данном исследовании проводилось изучение влияния на величину адгезии лазерной и плазмохимической обработки поверхности полиимида. Образцы представляют собой кремниевую подложку толщиной 300 мкм и размером 1×1,5 см

с нанесенной методом центрифугирования и имидизированной полиимидной пленкой толщиной 8–10 мкм. Проведена обработка поверхности полиимидной пленки на ИК-лазере в различных режимах, варьировалась мощность излучения, его частота и скорость прохождения по поверхности образца. Плазменная обработка поверхности полиимидной пленки проходила в атмосфере трех различных газов: аргона, кислорода и элегаза. При этом для каждого из газов варьировались мощность плазменной обработки, расход газа и время обработки. Металлизация образцов после модификации поверхности полиимидной пленки выполнялась двумя способами: с помощью магнетронного распыления и электрохимической металлизации. Используя метод отрыва, провели измерение адгезии между слоем меди и полиимидной пленкой на получившихся образцах.

*Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда,
проект 23-29-00964.*

Литература

1. Kumar S., Chitoraga S., Shoo F. Status of the Advanced Packaging Industry 2021 — Yole Developpement. URL: <https://s3.i-micronews.com/uploads/2021/09/YIN-TR21223-Status-of-the-Advanced-PackagingIndustry-2021.pdf>.
2. Chitoraga S., Yeghoyan T., Shoo F. High-End Performance Packaging 2022 — Focus 2.5D/3D Integration. URL: <https://s3.i-micronews.com/uploads/2022/03/High-End-Performance-Packaging-2022-ProductBrochure.pdf>.
3. Lapedus M. Fan-Out Wars Begin // Semiconductor Engineering, 2018. URL: <https://semiengineering.com/fan-out-wars-begin>.
4. Braun T. et al. From Fan-out Wafer to Panel Level Packaging // Private Workshop hosted by Fraunhofer EMFT and Tech Search International, inc. Fraunhofer IZM, 2015. 37 p.
5. Lau J. H. Semiconductor Advanced Packaging. Springer, 2021. 513 p.



УДК 681.7.069.32 + 528.8

Исследование влияния внутренних тепловых и внешних факторов на взаимную точность установки сенсорных устройств на борту космического аппарата в целях обеспечения необходимой общей полосы захвата с гарантированным перекрытием

Разживалов П. Н., к. т. н., Лавренов В. А., к. т. н.
*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
razzhalovpavel@gmail.com, lavrenov.v.a@yandex.ru*

Проведено исследование сенсорных устройств, которые располагаются на борту космического аппарата. Исследование проводилось в целях обеспечения определенной взаимной точности установки сенсорных устройств для получения требуемой общей полосы захвата с гарантированным перекрытием. Определена предельная погрешность углов полей зрения сенсорных узлов в зависимости от различных внутренних и внешних факторов. Установлена связь общей полосы захвата и перекрытия от предельной погрешности углов полей зрения сенсорных устройств.

Ключевые слова: космический аппарат; сенсорное устройство; предельная погрешность поле зрения; полоса захвата; перекрытие.

Современные сенсорные системы на борту космического аппарата предназначены для обеспечения получения целевой информации в результате проведения оптико-электронной съемки в панхроматическом (черно-белом) и мультиспектральном (цветном) каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазона спектра с преобразователем аналогового изображения в цифровой сигнал передачи в бортовую аппаратуру высокоскоростной радиолинии. Для обеспечения общей полосы захвата не менее 110 км (с гарантированным перекрытием не менее 1 км) на борт космического аппарата устанавливаются две сенсорные системы. При этом угол 2α между визирными осями объективов сенсорных систем (суммарный угол поля зрения) должен составлять величину $4^{\circ}28'$. Угол α — это угол между визирной осью объектива одной сенсорной системы и базовой осью космического аппарата. Вышеуказанные углы материально образуются за счет технологии изготовления базовой посадочной поверхности космического аппарата, кронштейнов и посадочных поверхностей (а также ряда других деталей) самих сенсорных систем.

В исследовании дано определение предельной погрешности сенсорной системы и ее составных частей — внешней погрешности и собственной погрешности. Внешняя погрешность обусловлена конструктивными особенностями элементов космического аппарата. Собственная погрешность обусловлена погрешностями изготовления и установки, а также нестабильностью размеров конструктивных и оптических элементов самой сенсорной системы из-за воздействия внутренних тепловых или внешних механических факторов.

В результате проведенного исследования была определена величина предельной погрешности для одной сенсорной системы — угол α , а также для суммарного поля зрения между двумя системами. Соответствующая величина предельной

погрешности для угла α составила 10'. С учетом полученной величины предельной погрешности угла α были проведены дополнительные расчеты для подтверждения обеспечения общей полосы захвата и гарантированного перекрытия. Общая полоса захвата составила от 112 до 120,4 км, а минимальное значение перекрытия составило 2 км. Таким образом, в ходе исследования была установлена величина предельной погрешности для угла α и доказано, что величина погрешности является допустимой для сенсорных систем, которые установлены на космическом аппарате.

Литература

1. Малинин В. В. Моделирование и оптимизация оптикоэлектронных приборов с фотоприемными матрицами. — Новосибирск: Наука, 2005.
2. Захаржевский С. Б., Курносенко А. Е. Расчет изделий электроники на механические и тепловые воздействия в САПР Сгео: Учеб. пособие. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. — 56 с.: ил.
3. Романова Е. Б., Кузнецова О. В., Кузнецова А. Ю. Основы конструирования электронных средств: Учебно-методическое пособие. — СПб.: университет ИТМО, 2017. — 53 с.
4. Алексеев В. Ф., Каленкович Н. И. Конструирование радиоэлектронных устройств: лабораторный практикум. — Минск: БГУИР, 2008. — 36 с.



УДК 621.3.049.76

Тепловое моделирование электронного блока рамочной конструкции, выполненного на основе аддитивных технологических процессов

Волков С. В.^{1,2}, Кобзева А. С.¹, к. т. н., Вертянов Д. В.², д. т. н.,
Тимошенков С. П.²

¹ АО «НИИ «Субмикрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
serzh.volkov.98@inbox.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Проведено тепловое моделирование электронного блока РЭА, используемого в системе анализа физических параметров окружающей среды. По результатам произведен сравнительный анализ тепловых полей электронного блока с рамой из литевых материалов АМгб, Д16, а также материалов аддитивного производства, в частности высокопрочного порошка РС-553 на основе алюминиевого сплава Al-Mg-Sc.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура (РЭА); электрорадиоизделие (ЭРИ); аддитивные технологии (АТ); тепловой режим; метод конечных элементов (МКЭ); система автоматизированного проектирования (САПР).

Современные направления развития в электронной промышленности задают тренд на увеличение производительности и уменьшение размеров разрабатываемых электронных устройств, что приводит к усложнению задач по обеспечению охлаждения сложных изделий различного назначения. В таких условиях особенно важной становится разработка передовых решений для улучшения теплоотвода механических конструкций электронных устройств, включая использование материалов с высокой теплопроводностью (сплавов алюминия Al, меди Cu и т. д.) [1]. Реализация подобных систем теплоотвода может быть построена на основе использования аддитивных технологий (АТ), которые позволяют изготовить сложную геометрическую структуру изделия с учетом необходимых механических свойств и массогабаритных параметров.

Обеспечение установившегося теплового режима в электронном блоке (систем связи, систем анализа внешних параметров среды и т. д.), при котором все элементы работают в соответствии с требованиями технических условий, является одной из основных задач, решаемых при конструировании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Для предотвращения перегрева компонентов РЭА возникает необходимость в разработке эффективной системы теплоотвода, которая смогла бы обеспечить стабильное функционирование электронных элементов в различных режимах работы устройства [2].

Цель работы — проведение сравнительного анализа тепловых полей работы электронного блока с рамой из различных материалов на предмет тепловой отдачи и других параметров рассматриваемой физической системы.

Для снижения воздействия изменений температуры на элементы конструкции необходимо применять материалы с минимально возможным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), теплоемкостью и максимальной теплопроводностью. Данным критериям соответствуют конструкционные материалы, в частности алюминиевые сплавы марок АМг6, Д16, используемые в традиционной технологии изготовления, а также материалы аддитивного производства, представляющие из себя порошки на основе металлических сплавов (например AlSi10Mg, AlMgSc). В частности, в данной работе производилась оценка механических свойств и эксплуатационных характеристик металлического порошка PC-553 на основе алюминиевого сплава системы Al-Mg-Sc, обладающего высокой твердорастворной закалкой и теплопроводностью.

Основной задачей ставилось проведение моделирования тепловых полей при различных режимах работы электронного блока рамочной конструкции РЭА, выполненной на основе металлического порошка PC-553 системы Al-Mg-Sc, с использованием средств системы автоматизированного проектирования (САПР), основанной на методе конечных элементов (МКЭ). Также в процессе моделирования теплового поля электронного блока определялись пороговые температуры и показатели тепловыделения на электрорадиоизделяях (ЭРИ).

Стоит отметить, что тепловое моделирование проводилось в условиях, соответствующих техническим эксплуатационным характеристикам электронного блока. В частности, были рассмотрены тепловые поля электронного блока при граничных условиях, соответствующих номинальному и максимальному режимам работы.

Литература

1. Sung-Min Kim, Issam Mudawar. Review of databases and predictive methods for heat transfer in condensing and boiling mini/micro-channel flows // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. Vol. 77. P. 627–652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.036>.
2. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1976. — 232 с.



УДК 621.389

Анализ S-параметров в микросборке с торцевой коммутацией с использованием дву- и трехмерных сред моделирования

Вертянов Д. В., Евстафьев С. С., Батин С. А.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Рассмотрены двумерные и трехмерные САПР моделирования целостности сигналов, S-, Z- и Y-параметров и их функциональные возможности для анализа воздействия торцевой коммутации в микросборке на прохождение сигнала. Проведено моделирование S-параметров торцевой коммутации на частотах до 1 ГГц и сравнение с воздействием классических переходных отверстий.

Ключевые слова: микросборка; торцевая коммутация; целостность сигналов; S-параметры; трехмерная компоновка.

В последние десятилетия микроэлектроника претерпела значительные изменения, переходя от традиционных двумерных структур к более инновационным трехмерным архитектурам [1, 2, 3]. Эти изменения обусловлены стремительным развитием технологий и постоянным увеличением требований к производительности и компактности микроэлектронных устройств [4]. Одним из ключевых трендов в современной микроэлектронике является трехмерная компоновка [5]. В отличие от двумерных изделий трехмерная компоновка позволяет увеличить плотность интеграции не только за счет расположения компонентов в плоскости, но и за счет использования высоты изделия.

Важным аспектом трехмерной компоновки является технология формирования вертикальной коммутации между различными уровнями. Для этого между уровнями трехмерной сборки формируются вертикальные проводящие соединения для передачи сигналов между различными слоями структуры. Благодаря такой вертикальной коммутации удается значительно сократить расстояние между элементами, что повышает скорость передачи данных и снижает потребление энергии. Однако использование вертикальной межслойной коммутации предъявляет серьезные требования к разработчику таких систем. В этом случае остро встает вопрос по контролю целостности сигналов, проходящих по торцевой коммутации, требования по качеству которых необходимо соблюдать для обеспечения корректной передачи данных внутри микросистемы.

Вопрос анализа целостности сигналов в цепях с элементами вертикальной коммутации является важным и актуальным. Для решения этих задач существуют специальные САПР, позволяющие выполнять моделирование поведения сигнала в цепях электронных средств, причем с их помощью возможно проведение как быстрого анализа, иногда называемого двумерным, так и комплексного анализа, учитывающего распространение сигнала во всем объеме проводников. К недостаткам двумерных моделей можно отнести невозможность применить САПР для анализа нестандартных проводников и недостаточную точность из-за использования упрощенных математических моделей. Для анализа прохождения сигналов в торцевой коммутации требуется использовать трехмерные решения.

Было проведено моделирование S-параметров в цепях с торцевой коммутацией прямоугольной формы и цепях с круглым переходным отверстием на частотах

от 0 до 1 ГГц. Для подтверждения зависимости качества сигнала от его расположения в большей степени, чем от формы, также был проведен анализ с переходным отверстием, повторяющим форму торцевой коммутации.

Работа проводилась в рамках финансовой поддержки Минобрнауки в рамках государственного проекта FSMR-2022-002.

Литература

1. Kang J.-H., Shin H., Kim K., Song M.-K., Lee D., Meng Y., Choi C., Suh J. M., Kim B., Kim H., Hoang T., Park B.-I., Zhou G., Sundaram S., Vuong P., Shin J., Choe J., Xu Z., Younas R., Bae S.-H. Monolithic 3D integration of 2D materials-based electronics towards ultimate edge computing solutions // *Nature Materials*, 2023. Vol. 22. P. 1–8.
2. Patti R. Three-Dimensional Integrated Circuits and the Future of System-on-Chip Designs // *Proceedings of the IEEE*, 2006. Vol. 94. P. 1214–1224.
3. Topol A., La Tulipe D., Shi L., Frank D., Bernstein K., Steen S., Kumar A., Singco G., Young A., Guarini K. W., Jeong M. Three-dimensional integrated circuits // *IBM Journal of Research and Development*, 2006. Vol. 50. P. 491–506.
4. Lipton R. 3D-vertical integration of sensors and electronics // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007. Vol. 579. P. 690–694.



УДК 629.7.054.07

Компьютерное моделирование пьезоактюаторов и подвижных зеркал кольцевых резонаторов лазерных гироскопов

Синельников А. О.^{1,2}, к. т. н., Тихменев Н. В.¹, к. ф.-м. н., Ушанов А. А.¹, аспирант, Назаров С. И.¹, аспирант

¹ АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения»
129226, г. Москва, просп. Мира, 125
corund@gosniip.ru

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
information@rudn.ru

Построены компьютерные модели пьезоактюаторов подвижных зеркал кольцевых резонаторов лазерных гироскопов. Исследованы амплитудно-частотные характеристики двух типов конструкции. Выявлены основные особенности, определяющие искривления и перекосы пьезоактюаторов и зеркал, показаны пути их уменьшения.

Ключевые слова: пьезоактюатор; кольцевой резонатор; лазерный гироскоп; бесплатформенная инерциальная навигационная система.

В настоящее время большинство производимых в мире высокоточных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) строится на базе лазерных гироскопов (ЛГ) [1]. Для поддержания работоспособности ЛГ при внешних температурных и механических воздействиях требуется обеспечение активной стабилизации периметра кольцевого резонатора с точностью единиц нанометров. Для этой цели в конструкции ЛГ применяются подвижные зеркала, управляемые пьезоактюаторами.

Основной задачей пьезоактюатора является обеспечение прецизионного возвратно поступательного движения подвижного зеркала без перекосов и искривлений отражающей поверхности. Объединенную конструкцию пьезоактюатора с подвижным зеркалом принято называть пьезокорректором. Пьезокорректоры являются исполнительными элементами активной системы регулировки периметра кольцевого резонатора [2].

В работе приведены результаты компьютерного моделирования наиболее известных конструкций пьезокорректоров отечественного производства. Показаны условия возникновения и пропадания искривления отражающей поверхности пьезозеркала в зависимости от конструкции его мембраны и жесткого центра, на который наносится напыление.

Построенные компьютерные модели позволяют выявить склонность различных конструкций пьезокорректоров к перекосам и оценить их величину, что позволяет найти пути их уменьшения.

В результате настоящей работы построены компьютерные модели пьезокорректоров для кольцевых резонаторов различного типа. Показана возможность изучения перекосов и искривлений поверхностей подвижных зеркал по амплитудно-частотным характеристикам пьезоактюатора. Выявлены основные особенности пьезокорректоров, определяющие искривления и перекосы отражающей

поверхности зеркал. Показаны пути их уменьшения. Это позволяет повысить точностные и эксплуатационные характеристики ЛГ и БИНС на их основе [3].

Литература

1. Пешехонов В. Г. Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация, 2022. — Т. 30. — № 1 (116). — С. 3–11. DOI: 10.17285/0869-7035.0084.
2. Кузнецов Е. В., Синельников А. О., Голяев Ю. Д., Колбас Ю. Ю., Соловьева Т. И. Компьютерное моделирование работы системы регулировки периметра резонатора зеемановского лазерного гироскопа // Автоматизация в промышленности, 2022. — № 3. — С. 45–49. DOI: 10.25728/avtprom.2022.03.07.
3. Тихменев Н. В., Назаров С. И., Ушанов А. А., Синельников А. О. Исследование функционирования кольцевого лазерного гироскопа при вибрационных воздействиях // Управление большими системами. — Вып. 109. — М.: ИПУ РАН, 2024. — С. 293–309. DOI: 10.25728/ubs.2024.109.13.



УДК 621.3

Эффективность планарных и сетчатых электрохимических преобразователей

Горина Е. В.¹, Дудкин П. В.^{1,2}, Криштоп В. Г.^{1,2,3}

¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

² ООО «Сейсмотроника»
111020, г. Москва, Юрьевский пер., 11

³ Институт проблем технологии микроэлектроники РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна 6
krishtop@iptm.ru

Проведена оценка эффективной длины электродов для сетчатого и планарного электрохимических преобразователей.

Ключевые слова: сенсоры; электрохимические микросистемы; планарный электрохимический преобразователь; нелинейные эффекты; передаточная функция; диффузионный перенос.

Инерциальные электрохимические преобразователи (ЭХП) используются для измерений колебательного ускорения и скорости, их главное достоинство — низкий уровень собственных шумов и широкий динамический диапазон в инфразвуковой части спектра, вплоть до 0,01 Гц [1, 2]. ЭХП традиционно применяются в сейсмологии, сейсморазведке и гидроакустике [3–5], также есть примеры успешного применения для инерциальных систем навигации [6] и систем инженерного мониторинга [7].

Традиционно ЭХП изготавливаются с электродами из металлической сетки, но также развивается планарная технология, где электроды наносятся на поверхность кремниевого чипа с помощью микроэлектронных технологий [8–13].

В докладе кратко рассмотрены принципы работы инерциальных электрохимических преобразователей. Рассчитана эффективная длина проволоки для сетчатого электрохимического преобразующего элемента, и эффективная длина (площадь) электрохимического преобразующего элемента планарной конструкции. Предложена оптимизированная планарная структура с высокой эффективностью.

Литература

1. Агафонов В. М., Криштоп В. Г., Сафонов М. В. Измерительные устройства на основе молекулярно-электронного переноса в микро- и наноструктурах // Нано- и микросистемная техника, 2010. — № 6 (119). — С. 47–53.
2. Криштоп В. Г. и др. Технология и применение электрохимических преобразователей // Наноиндустрия, 2020. — № S96-2. — С. 450–455.
3. Shabalina A. S., Krishtop V. G. The precision seismometer based on planar electrochemical transducer // Proceedings of SPIE, ICMNE-2016, 2016. 102241K.
4. Агафонов В. М., Криштоп В. Г., Егоров И. В. Сейсмические датчики на принципах молекулярно-электронного переноса в твердотельных и жидкостных микроструктурах // Приборы и системы разведочной геофизики, 2013. — Т. 43. — № 1. — С. 39–49.

5. Криштоп Т. В. и др. Высокоточный гидрофон на основе электрохимического преобразователя давления // *Наноиндустрия*, 2019. Спецвыпуск (89). — С. 582–585.
6. Дудкин П. В. и др. Метод коррекции ошибки электрохимического гироскопа // *Наноиндустрия*, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 525–526.
7. Kapustian N. K. et al. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow // 6th European Workshop on the seismic behavior of Irregular and Complex Structures (6EWICS) O. Lavan, M. De Stefano (eds.), 2011.
8. Дудкин П. В. и др. Планарный электрохимический магнитогидродинамический акселерометр // *Наноиндустрия*, 2020. — № S96-2. — С. 407–410.
9. Жевненко Д. А. и др. Исследование электрохимической части передаточной функции электрохимического преобразователя // *Наноиндустрия*, 2019. — № S (89). — С. 599–603.
10. Криштоп В. Г. и др. Планарные магнитогидродинамические электрохимические преобразователи // *Наноиндустрия*, 2020. — Т. 13. — № S5-2 (102). — С. 552–555.
11. Криштоп В. Г. и др. Планарные магнитогидродинамические электрохимические преобразователи // *Наноиндустрия*, 2020. — Т. 13. — № S4 (99). — С. 483–484.
12. Жевненко Д. А. и др. Методы моделирования процессов массо-и зарядопереноса в электрохимических микросистемах // *Наноиндустрия*, 2020. — Т. 13. — № S4 (99). — С. 511–512.
13. Жевненко Д. А. и др. Оптимизация параметров планарных электрохимических преобразователей // *Наноиндустрия*, 2020. — № S96-2. — С. 416–419.



УДК 621.382.2

Газовый сенсор на основе легированных азотом углеродных нанотрубок

Рудык Н. Н.¹, к. т. н., Ильин О. И.¹, к. т. н., Чефранов А. А.², Тихолоз А. А., Яковенко М. С.

¹ Южный федеральный университет,
лаборатория технологий функциональных наноматериалов
Института нанотехнологий, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е
nrrudyk@sfnedu.ru

² Южный федеральный университет,
Передовая инженерная школа «Инженерия киберплатформ»
347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81

В работе представлены результаты разработки конструкции, исследования характеристик и оценки чувствительности макета газового датчика с чувствительным элементом на основе массива ориентированных углеродных нанотрубок.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; газовые сенсоры; химическое осаждение из газовой фазы.

В настоящее время, в условиях усложняющейся экологической обстановки и обострения террористической опасности, актуальным направлением развития сенсорики является создание энергоэффективных сенсоров газа для экологического мониторинга [1], обнаружения взрывчатых веществ [2], ранней диагностики заболеваний [3].

Углеродные нанотрубки (УНТ) благодаря уникальной структуре, а также электрическим и химическим свойствам, являются перспективным материалом для чувствительных элементов сенсоров газа [4]. Управление параметрами УНТ, а также топологией сенсорной структуры, позволит улучшить такие параметры газового сенсора, как селективность, чувствительность, энергоэффективность и срок службы. При этом размещение на подложке массива чувствительных элементов сенсоров на основе УНТ позволит повысить технологичность, а также снизить влияние шумов и стоимость при массовом производстве.

Для создания сенсора использовалась подложка Si (100), на которой методом плазмохимического осаждения был сформирован изолирующий слой SiO₂ толщиной 2 мкм. В качестве материала контактов использовался TiN, а в качестве катализатора использовался Ni толщиной 10 нм, напыленные методом магнетронного распыления. Выращивание массива переплетенных УНТ производилось при температуре 660 °С в атмосфере ацетилена и аммиака.

Конструкция сорбционного сенсора представляет собой ряд встречно-штыревых электродов, на поверхности которых методом химического осаждения из газовой фазы выращен чувствительный слой на основе переплетенных УНТ, обладающих развитой поверхностью, а также хорошим электрическим контактом с малым сопротивлением.

Экспериментальные исследования макета газового сенсора осуществлялись с помощью газоаналитической установки МИКРОГАЗ-ФМ (НТПО Экоприбор,

Россия). В качестве анализируемых газов использовались NH_3 , CO и NO_2 , в качестве разбавителя и продувочного газа использовался азот. Оценка чувствительности сенсора проводилась по относительному изменению сопротивления.

На рис. 1 представлен отклик чувствительного элемента сорбционного сенсора на основе УНТ на аммиак и угарный газ с концентрацией 500 ppm, и на NO_2 с концентрацией 20 ppm.

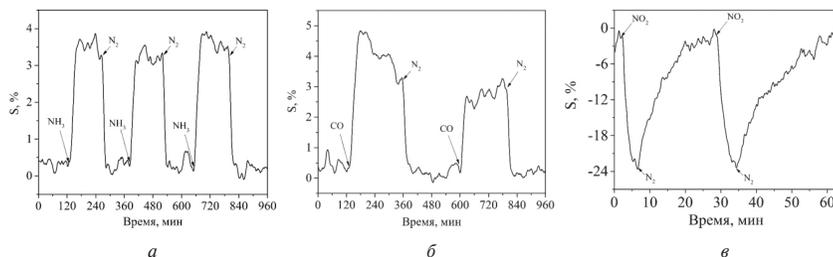


Рис. 1. Отклик сорбционного сенсора на: а) NH_3 ; б) CO ; в) NO_2

Чувствительность сорбционного сенсора составила 3,7% для газа аммиака, 3,2% для угарного газа и 23,9% для NO_2 . Среднее время отклика T_{90} (время, необходимое для индикации 90% концентрации газа) чувствительного элемента сорбционного сенсора для аммиака, угарного газа и NO_2 составило 35, 28 и 125 сек. соответственно, а время восстановления — 42, 25 и 690 сек. соответственно.

Таким образом, предложенный газовый сенсор показал высокую чувствительность к NO_2 , которая достигается при работе при комнатной температуре. Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных сенсоров на основе УНТ.

Литература

1. Valle M. D. Sensors as green tools in analytical chemistry / Valle M. D. // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2021. Vol. 31. P. 100501.
2. González-Calabuig A. Electronic tongue for nitro and peroxide explosive sensing / González-Calabuig A., Cetó X., Valle M. // Talanta, 2016. Vol. 153. P. 340–346.
3. Nasiria S., Khosravanic M. R. Progress and challenges in fabrication of wearable sensors for health monitoring // Sensors and Actuators A, 2020. Vol. 312. P. 112105.
4. Zhuohao Xiao et al. Recent Development in Nanocarbon Materials for Gas Sensor Applications // Sensors and Actuators B, 2018. S0925-4005(18)31277-2.



УДК 53.087.92

Высокоточные миниатюрные датчики линейных ускорений для перспективных систем безопасности

Жукова С. А.

ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»

115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а

szh17@ya.ru

Разработана технология изготовления микромеханических акселерометров полностью российского производства с диапазонами чувствительности ± 1 , ± 10 , ± 30 g для широкого спектра применений.

Ключевые слова: МЭМС; микромеханика; акселерометр.

Одним из направлений деятельности ФГУП «ЦНИИХМ» является разработка перспективных технологий, необходимых для создания робототехнических наземных, авиационных и морских автономных комплексов.

Для решения этих задач в настоящее время ФГУП «ЦНИИХМ» реализован комплекс инициативных работ в области производства приборов для измерения параметров движения, микромеханических датчиков, модулей и изделий на их основе, инфракрасных детекторов, тонкопленочных магнитометров, солнечных датчиков, пленочных тепловых излучателей, твердотопливных микродвигателей и прочих прецизионных датчиков и актюаторов в микроминиатюрном исполнении [1–4]. Организовано производство микроэлектромеханических систем (МЭМС), включающее технологическую линию с топологическими нормами 0,5 мкм на пластинах диаметром до 200 мм, производство микросборок (до 10 тыс. шт. в год), цех механообработки, сборочную линию, испытательный центр и др. Действующее производство МЭМС обеспечивает возможные объемы выпуска изделий до 10 000 шт./год.

Вместе с тем, применение указанных изделий обеспечивает новые качества аппаратуры и решение задач импортозамещения компонентов потребительской электроники, систем Интернета вещей и домашней автоматизации, систем управления и безопасности автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта, систем контроля состояния промышленных зданий и сооружений, а также создания новых типов автоматизированных устройств медицинского применения.

В рамках выполнения инициативной ОКР «Разработка высокоточных миниатюрных микромеханических датчиков линейных ускорений» создана линейка микромеханических акселерометров полностью российского производства с диапазонами чувствительности ± 1 , ± 10 , ± 30 g широкого круга применений. Изделия формируют выходной аналоговый сигнал, пропорциональный действующему вдоль оси чувствительности ускорению.

Образцы являются функциональными аналогами линейных микромеханических акселерометров иностранного производства фирм Safran SA, Murata Electronics Oy, Analog Devices, Tronics.

Акселерометры изготавливаются в металлокерамических безвыводных корпусах и обеспечивают возможность установки в изделие назначения с применением стандартных методов поверхностного монтажа оплавлением паяльной пасты. В составе акселерометра применяется маятниковый кремниевый чувствительный

элемент, изготовленный по технологии МЭМС, обеспечивающий возможность достижения высоких эксплуатационных характеристик в сочетании со стойкостью и прочностью к воздействию внешних воздействующих факторов. Гарантировано функционирование в диапазоне температур $-60...+85^{\circ}\text{C}$. Изделие оснащено встроенным датчиком температуры, который может быть использован для термокоррекции. Особенности конструкции изделий и технологии их создания позволяют добиться высокой прочности к ударным воздействиям.

Литература

1. Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю. Проблемы технологии герметизации на уровне пластин при изготовлении чувствительного элемента для микромеханического акселерометра // *Нано и микросистемная техника*, 2023. — Т. 25. — № 5. — С. 221–228.
2. Баранов А. А., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Турков В. Е. Особенности технологии изготовления чувствительных элементов преобразователей магнитного поля // *Наноиндустрия*, 2020. Спецвыпуск (4s). — Т. 13 (99). — С. 474–476.
3. Жукова С. А., Турков В. Е., Демин С. А., Четверов Ю. С., Солодков А. А. Чувствительные элементы инфракрасных систем технического зрения на основе микроболометрических матриц формата 640×480 пикселей // *Нано- и микросистемная техника*, 2017. — № 2. — С. 105–114.
4. Жукова С. А., Riskin Д. Д., Турков В. Е., Бабаевский П. Г., Резниченко Г. М. Реактивные микродвигатели, изготавливаемые по технологии МСТ // *Нано- и микросистемная техника*, 2014. — № 12. — С. 7–22.



УДК 681.586.2

Оценка влияния технологических погрешностей при изготовлении чувствительных элементов твердотельных волновых гироскопов на их ожидаемые характеристики

Жукова С. А., Котельников А. С., Обижаев Д. Ю., Фролов Е. Н.

ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»

115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а

Приведены результаты расчетов собственных частот и форм колебаний чувствительного элемента твердотельного волнового гироскопа, обусловленных различными технологическими погрешностями, формируемыми при изготовлении исходной пластины.

Ключевые слова: МЭМС; твердотельный волновой гироскоп.

Одним из направлений создания микромеханических гироскопов является использование конструкций с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде упругого кольца. Такие ММГ образуют класс твердотельных волновых гироскопов (ТВГ), которые отличаются высокой точностью и стабильностью. Принцип действия таких ТВГ основан на свойстве инертности системы упругих волн в свободном кольцевом резонаторе по отношению к его вращению вокруг оси симметрии. При возбуждении вибрации в кольцевом резонаторе возникает стоячая поперечная волна, которая характеризуется неизменным положением узлов и пучностей. Вращение основания кольцевого резонатора вокруг его оси приводит к прецессии узлов и пучностей стоячей волны, причем угол поворота картины амплитуд волн резонатора пропорционален угловой скорости. Погрешность измерения угловой скорости ТВГ характеризуется разностью собственных частот второй формы колебаний ЧЭ. При этом разность частот должна быть сведена к минимуму. Регулировка разности частот ЧЭ производится в процессе изготовления в ограниченном диапазоне (не более 30 Гц). Управление кольцом осуществляется индукционным методом [1, 2]. Базовая часть технологий изготовления ЧЭ этого типа основывается на сквозном высокоанизотропном травлении конструкционного материала — пластины монокристаллического кремния толщиной порядка 100 мкм [3]. При этом, качество исходной пластины может оказывать существенное влияние на характеристики.

Целью настоящей работы является определение технологических погрешностей которые допустимы при изготовлении исходной кремниевой пластины, то есть не приводят к критической разности собственных частот. Рассмотрено влияние следующих дефектов: дугообразный прогиб пластины монокристаллического кремния, клиновидная разнотолщинность пластины, влияние механически напряженного слоя на одной из сторон пластины, несовпадение плоскости пластины с выбранной ориентацией кристаллографической решетки.

Для проведения расчетов использован метод конечных элементов, с помощью которого проведена оценка влияния дефектов изготовления пластины монокристаллического кремния с ориентацией [111] на колебания ЧЭ ТВГ. В качестве выходного параметра выбрано изменение значений девятой и десятой резонансных частот. Рассчитанные рабочие частоты чувствительного элемента с дефектами сравнивались со значением идеальной модели — 14087,11 Гц.

В результате расчетов резонансных характеристик ЧЭ ТВГ установлено, что клиновидная разнотолщинность пластины вплоть до 5 мкм приводит к смещению рабочих частот не более чем на 0,38 Гц, т.е. является несущественной ошибкой; дугообразный прогиб пластины монокристаллического кремния вплоть до 100 мкм приводит к смещению рабочих частот не более чем на 1 Гц, т.е. является несущественной ошибкой; механически напряженный слой толщиной до 25 мкм на одной из сторон пластины приводит к смещению рабочих частот не более чем на 13 Гц (около 0,1 % от рабочей частоты) т.е. является ошибкой устранимой при балансировке; несовпадение плоскости пластины с ориентацией [111] на угол 3° относительно оси X и оси Z приводит к смещению рабочих частот на 127,31 Гц т.е. является критической ошибкой требующей введения входного контроля к используемым пластинам кремния.

Литература

1. Ayazi F., Najafi K. A HARPSS Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope // Journal of Microelectromechanical Systems, 2001, Vol. 10, № 2, P. 169–179.
2. Putty M. W. A micromachined vibrating ring gyroscope. — Ph.D. dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, March 1995.
3. Жукова С. А., Новичков Е. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю., Турков В. Е., Ромахин П. А., Ульянов С. А., Иванов С. Ю. Особенности технологии формирования чувствительных элементов инерциальных датчиков на основе структур «кремний над полостью», герметезуемых на уровне пластин // Наноиндустрия, 2021. — Т. 7. — № 107. — С. 492–494. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.492.494.



УДК 681.586.2

Метод формирования функциональных алюминиевых проводников с заданным сопротивлением для микромеханических чувствительных элементов датчиков угловых скоростей

Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю.

ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»

115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а

Рассмотрены процессы сухого травления толстых алюминиевых слоев в хлор-содержащей плазме для формирования функциональных проводников с заданным сопротивлением.

Ключевые слова: МЭМС; твердотельный волновой гироскоп; плазмохимическое травление; алюминиевые проводники.

При изготовлении чувствительных элементов микромеханических чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков угловых скоростей волнового типа или твердотельных волновых гироскопов (ТВГ) требуется формирование узких токопроводящих проводников с заданным сопротивлением на основе толстых пленок алюминия. Применение жидкостных методов травления алюминия не позволяет обеспечить требуемой однородности процесса по площади обрабатываемой пластины, а также его воспроизводимости, что, приводит к существенному разбросу сопротивления формируемых проводников и его отклонению от номинальных значений. Таким образом, для формирования алюминиевых проводников требуется применение плазменных методов травления. Воспроизводимое получение вертикального профиля травления слоев алюминия толщиной более 1 мкм зависит от большого количества факторов: способа генерации плазмы, способа формирования слоя алюминия, площади поверхности обрабатываемого алюминия, параметров используемой фоторезистивной маски и др. Целью настоящей работы является исследование влияния условий плазмохимического травления алюминия, а также влияние пред- и постобработки покрытий на характеристики получаемого профиля травления и электрическое сопротивление алюминиевых проводников.

Проводники формировали на основе слоев алюминия толщиной 1400–1800 нм, полученных методами магнетронного распыления алюминиевой мишени. Фоторезистивные маски формировали на основе позитивных фоторезистов Megarosit SPR 220-3.0 толщиной 3000 нм или S1813 — 1300 нм. Топология маски состояла из дорожек шириной 4,5–6 мкм. Процессы плазмохимического травления алюминия проводили на установке реактивного ионного травления.

При проведении плазмохимического травления алюминия в смесях $\text{BCl}_3\text{-Cl}_2$, в случае использования фоторезистивных масок, на их поверхности образуется пассивирующий «защитный» слой, состоящий из продуктов полимеризации BCl_3 , алюминия и фоторезиста. Наличие этого слоя позволяет проводить глубокое травление алюминия без появления эффектов подтравы под маску [1], кроме того, при правильном подборе условий, устранить коррозию связанную с насыщением хлором боковой стенке алюминия.

Показано, что малейшие остатки фоторезистов на обрабатываемой в $\text{BCl}_3\text{-Cl}_2$ поверхности приводят к появлению ярко выраженных и существенных дефектов из-за формирования пассивирующих слоев около каждого загрязнения. Формируемый пассиватор обладает химической стойкостью по отношению к стандартным органическим растворителям, применяемым для удаления позитивных фоторезистов и типовому кислотному травителю алюминия. Для эффективного травления в смесях $\text{BCl}_3\text{-Cl}_2$ и для формирования бездефектной поверхности необходимо, после проведения этапа фотолитографии проведение дополнительной плазменной очистки в кислородсодержащей плазме. Удаление фоторезиста и остатков пассиватора после плазмохимического травления следует проводить в непосредственно после плазменного травления алюминия в кислородной плазме без дополнительных жидкостных обработок [2].

Установлено, что сформированные по предложенной методике алюминиевые проводники имеют разброс сопротивления по площади пластины диаметром 100 мм не превышающий $\pm 2,5$ Ом (при номинальном значении 75 Ом).

Дополнительно было проведено исследование влияния процесса вжигания алюминия на значение сопротивления формируемых алюминиевых проводников. Процесс проводили в среде формиנג-газа при температуре 530 °С после удаления фоторезиста. Показано, что сопротивление выводов после вжигания снижалось примерно на 10 %.

Предложенный метод позволит обоснованно подходить к формированию проводников с заданным сопротивлением на основе толстых слоев алюминия.

Литература

1. Jershen Maa and Bernard Halon. Anisotropic Dry Etching of Aluminum Films Deposited on Topographic Steps. Materials Research Society Symp. Proc. P. 68, 1986.
2. Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю., Жукова С. А., Ульянов С. А. Особенности травления толстых слоев алюминия в хлорсодержащей плазме // Перспективные технологии для систем безопасности, 2024. — № 1 (03). — С. 78–85.



УДК 621.315.592

Текущее состояние, проблемы и перспективы импортозамещения ключевых узлов специального технологического оборудования

Алексеев А. Н., к. ф.-м. н., Баранов Д. А., Виноградов А. Ю., Литвинов Н. А., Новиков С. А., Петров С. И., к. ф.-м. н.

АО «Научное и технологическое оборудование»

194156, г. Санкт-Петербург, вн.тер.г. Муниципальный округ Светлановское, просп. Энгельса, 27, лит. АД, офис 205

sales@semiteq.ru

Представлен краткий обзор текущего состояния импортозамещения ключевых узлов для производства специального технологического оборудования в АО «НТО», в т. ч. технические проблемы реинжиниринга, доступности приобретения базовых материалов и стандартных комплектующих.

Ключевые слова: специальное технологическое оборудование; вакуумное оборудование; импортозамещение; комплектующие; ключевые узлы.

Современная полупроводниковая промышленность и электронное машиностроение, в частности, основаны на заложенных еще в 1980-х гг. принципах функционирования глобальных цепей поставок. Сегодня в мире не осталось стран, которые бы имели производство всей номенклатуры ключевых узлов специального технологического оборудования (СТО) для выпуска ЭКБ, что качественно влияет на технологическую независимость каждой отдельной страны. С 2022 года отечественные разработчики и производители практически не имеют доступа к лучшим зарубежным комплектующим, ключевым узлам и материалам, используемым в электронном машиностроении. Одновременно, целый ряд ключевых узлов и комплектующих не производится в РФ или не соответствует требованиям для применения в вакуумной и высоковакуумной технике, что в значительной мере осложняет выпуск технологического оборудования, а также ремонт и обслуживание парка импортного СТО.

АО «НТО» более 23 лет разрабатывает и производит широкий спектр СТО для создания ЭКБ электронной промышленности, в т. ч. эпитаксиальное оборудование для роста материалов A^3B^5 , A^2B^6 и A^3N , а также целый ряд установок для формирования тонкопленочных структур на полупроводниковой пластине, в т. ч. оборудование для физического осаждения, плазмохимической обработки пластин и быстрого термического отжига. С 2014 года компания активно работает над импортозамещением ключевых узлов выпускаемого оборудования, постоянно расширяя номенклатуру изделий. В частности, целый ряд разработанных функциональных узлов и комплектующих сегодня используются для обеспечения ремонта и поддержания зарубежного оборудования.

В докладе рассматриваются особенности проектирования и технологичности изготовления ключевых функциональных узлов вакуумного и сверхвысоковакуумного оборудования, функциональных узлов (молекулярные источники установок молекулярно-лучевой эпитаксии, источники испарения металлов вакуумных установок напыления), контрольно-измерительных систем (лазерный интерферометр, система оптического контроля молекулярных потоков) и др., а также результаты их эксплуатации как на установках отечественного, так и зарубежного производства.

УДК 621.3.049.77(075)

Развитие продуктовой линейки и создание опытного производства отечественного кластерного оборудования для микроэлектроники

к. т. н. Щуренкова С. А., Афонин П. Е., Костюков Д. А., Шубников А. В.
*АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
sshchurenkova@niitm.ru*

По мере развития технологии выход годных кристаллов ИМС все больше зависит от привносимой дефектности. Переход минимальных размеров элементов ИМС в субстананометровую область потребовал разработки и создания линейки технологических модулей, реализующих основные операции КМОП-технологии, и объединения этих модулей в кластерные установки, значительно снижающие уровень привносимой дефектности.

Ключевые слова: кластерное оборудование; мини климатические кабины; транспортные системы; технологические модули.

С 2016 года АО НИИТМ сфокусировался на разработке и производстве кластерного оборудования, состоящего из атмосферного модуля распаковки и перегрузки пластин из SMIF контейнеров, шлюзовых камер, транспортной системы и набора технологических модулей, для обработки пластин диаметром 150–200 мм. Развитию этого направления в создании специального технологического оборудования (СТО) также способствовало государственное финансирование и участие в субсидиарных проектах. Первое кластерное оборудование «Кластер ТМ 200-01» было изготовлено в 2018 году, и в его составе были впервые в России разработаны и созданы системы распаковки и перегрузки пластин, ориентаторы пластин и вакуумные роботы, а также технологические модули атомно-слоевого осаждения (АСО — ALD), плазмохимического травления (ПХТ) поликремния, ПХТ SiO₂ и глубокого травления кремния на базе Бош (Bosch) процесса. В 2021–2023 гг. были разработаны технологические модули, предназначенные для применения в составе кластерного оборудования: быстрого термического отжига (БТО — RTA), магнетронного нанесения металлических слоев, атомно-слоевого травления (АСЕ — ALE), плазмоактивированного химического осаждения из газовой фазы (ПА ХОГФ — PE CVD) пленок двуокиси и нитрида кремния (в рамках реализации субсидиарного проекта в составе «СТО-2»). В 2023 году на основе технического задела, полученного при реализации проекта СТО-2, был разработан и произведен кластерный комплекс «Кластер ТМ 150 PVD», состоящий из 4-х модулей магнетронного нанесения металлических слоев, предназначенный для обработки пластин диаметром 150 мм, который был поставлен в Зеленоградский нанотехнологический центр (ЗНТЦ) для производства КМОП-микросхем и по маршруту GaN. В состав кластера входят технологические модули магнетронного напыления алюминия, титана, меди и золота. В «Кластере ТМ 150 PVD» используются магнитные катушки для заполнения отверстий с высоким аспектным соотношением и впервые разработанные в России магнетроны с вращающейся магнитной системой.



С 2022 года начались работы по «Проекту-300», в рамках которого были разработаны, изготовлены и испытаны экспериментальные образцы двух кластерных установок для обработки пластин диаметром 200–300 мм под уровень технологии 65 нм. Одна установка — «Кластер ПХТ 65 ТМ» для реализации процессов ПХТ функциональных слоев ИМС, вторая — «Кластер ПХО 65 ТМ» для реализации процессов ХОГФ (CVD), в том числе и ПА ХОГФ (PE CVD) функциональных слоев ИМС. Обе установки имеют мини климатические кабины с устройствами открытия ФОУП (FOUP) или СМИФ (SMIF) контейнеров с пластинами, ориентации пластин и загрузки пластин из контейнеров в шлюзовые камеры, а также вакуумные транспортные системы, к которым подсоединяются по 4 технологических модулей. В установке «Кластер ПХТ 65 ТМ» технологические модули: ПХТ алюминия, ПХТ поликремния, ПХТ диэлектрических пленок (двуокиси и нитрида кремния) и плазмохимического удаления фоторезиста. В установке «ПХТ 65 ТМ» технологические модули: ПА ХОГФ пленок SiO_2 на основе силана (SiH_4), ПА ХОГФ пленок SiO_2 на основе ТЭОС (TEOS), ПА ХОГФ пленок Si_3N_4 на основе силана и субатмосферное ХОГФ (СА ХОГФ) (SA CVD) пленок SiO_2 на основе ТЭОС. В рамках реализации проекта разработаны экспериментальные образцы системы контроля момента окончания процессов травления, оригинальные системы подачи жидких реагентов, в конструкции реакторов применяются керамические столы с электростатическим прижимом пластины, керамические нагреваемые столы, алюминиевые и кремниевые газовые души и другое высокотехнологичное оборудование. В 2022 году создан экспериментальный участок класса чистоты ИСО 7 для размещения и проведения исследовательских и предварительных испытаний кластерного оборудования Проекта-300. Параллельно проведены работы по реконструкции производственных помещений АО НИИТМ под изготовление кластерного оборудования, производственные площади обеспечены системами кондиционирования, системами подачи газов, водяными и выхлопными системами, улучшен класс чистоты производственных помещений. Планируется дальнейшее расширение производственных помещений АО НИИТМ.

В 2024 г. АО НИИТМ изготовил две кластерные 4-модульные установки «Кластер ПХТ AL», «Кластер ПХТ Poly Si» для обработки пластин диаметром 200 мм по заказу завода Микрон, предназначенных для промышленного применения в составе участка 200 КМОП. В состав «Кластера ПХТ AL» входит два модуля ПХТ алюминия и два модуля плазмохимического удаления фоторезиста. В состав «Кластера ПХТ Poly Si» входят четыре модуля ПХТ поликремния. В этом году также созданы опытные образцы (ОО) оборудования «Кластер ПХО 65 ТМ» и «Кластер ПХТ 65 ТМ» и завершаются их предварительные испытания. Готовится опытный участок класса чистоты ИСО 6 для размещения ОО кластеров по Проекту-300 и проведения приемочных испытаний. В ближайшее время НИИТМ планирует инициировать новые проекты по созданию промышленно ориентированных кластерных комплексов магнетронного нанесения слоев алюминиевой и медной металлизации на пластинах диаметром 200 мм.

УДК 621.315.592

Разработка эпитаксиального и планарного оборудования для материалов A^3B^5 — переход от R&D к производственно-ориентированному уровню

Алексеев А. Н., Гердт А. Д., Петров С. И., Литвинов М. А.

АО «НТО»

194156, г. Санкт-Петербург, просп. Энгельса, 27

petrov@semiteq.ru;

Представлены результаты перспективных разработок эпитаксиального и планарного оборудования для СВЧ-микроэлектроники, оптоэлектроники и радиофотоники. Показан текущий уровень разработок и производства опытных образцов оборудования для выращивания широкого спектра приборных гетероструктур на основе нитридов, арсенидов и антимонидов третьей группы, а также КРТ. Представлены результаты разработки производственно-ориентированного оборудования для плазмохимического травления и осаждения, а также электронно-лучевого и магнетронного напыления. Для решения поставленных задач необходима локализация производства критически важных ключевых узлов.

Ключевые слова: эпитаксия; A^3B^5 ; МЛЭ; МОГФЭ; плазмохимия; электронно-лучевое напыление.

На российском рынке сегодня существует потребность в установках молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксии для получения гетероструктур на основе материалов A^3B^5 на подложках диаметром 100–150 мм. Применительно к молекулярно-лучевой эпитаксии необходимы установки для выращивания гетероструктур с увеличенным объемом источников и в ряде случаев с роботизированной загрузкой. Данные установки должны обеспечить стабильность ростовых параметров, которая критически важна для целого ряда перспективных приборов оптоэлектроники и микроэлектроники. Среди них можно выделить задачи по созданию мощных и малолшумящих СВЧ-транзисторов на основе GaAs и GaN и оптоэлектронных приборов, таких как вертикально-излучающие полупроводниковые лазеры (VCSEL), квантово-каскадные лазеры (QCL), однофотонные излучатели для квантовых компьютеров на основе гетероструктур с квантовыми точками. Также данное оборудование востребовано для получения инфракрасных фотоприемников на основе арсенидов и антимонидов третьей группы, а также соединений кадмий-ртуть-теллур (КРТ). Кроме того, для решения указанных задач необходима разработка установок МОС-гидридной эпитаксии гетероструктур на основе материалов A^3B^5 , в том числе с групповой загрузкой пластин.

Помимо этого существует необходимость разработки установок плазмохимического травления и осаждения, а также электронно-лучевого напыления и магнетронного распыления, близких функциональных аналогов зарубежного оборудования для реализации уже используемых технологических маршрутов для производства ЭКБ на ключевых российских предприятиях. В частности требуется разработка и производство критически важных ключевых узлов, таких как



цилиндрические источники индуктивно-связанной плазмы для установок плазмохимии, а также источников электронно-лучевого напыления для физического осаждения.

В докладе представлены результаты разработки универсальной платформы установок МЛЭ, функционального аналога установки Riber412 с увеличенной вместимостью источников и автоматизированной загрузкой образцов для выращивания гетероструктур на основе сложных полупроводников. Такие установки востребованы для выращивания гетероструктур на основе GaAs и GaN на ряде российских предприятий. Кроме того, в настоящее время данная платформа используется для разработки установок молекулярно-лучевой эпитаксии антимонидов третьей группы, включая разработку вентильного источника сурьмы, а также эпитаксии соединений на основе КРТ. Также в докладе представлены результаты разработки совместно с ведущими организациями отрасли установки МОГФЭ для выращивания гетероструктур на основе GaN, функционального аналога установки Aixtron. Результаты данной разработки в дальнейшем планируется использовать для создания установок МОС-гидридной эпитаксии гетероструктур на основе других соединений A^3B^5 . Кроме того, представлены результаты разработки оборудования для планарной обработки пластин, используемых на ключевых российских предприятиях, таких как установки плазмохимического травления и осаждения, а также физического осаждения, функциональных аналогов зарубежных установок Corial и Evates. Рассматриваются вопросы проектирования и технологичности изготовления ключевых функциональных узлов оборудования. Данные разработки обеспечат российских разработчиков и производителей полупроводниковых приборов средствами производства мирового уровня. Продемонстрированы результаты использования серийно выпускаемого отечественного оборудования в производственных циклах отечественных предприятий производителей ЭКБ.

УДК 621.3.049.77(075)

Разработка отечественного оборудования ионной имплантации для полупроводникового производства

Авдиенко А. А.¹, Аверьянов Е. В.¹, Азаров А. А.¹, Бирюков М. Г.¹, Кузьмич К. В.¹,
Одинокое В. В.¹, Павлов Г. Я.¹, Старостенко А. А.², Третьяков Е. В.¹,
Чуркин И. Н.², Шпаков А. Н.¹

¹ АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
info@niitm.ru

² Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

Развитие ионной имплантации идет вместе с развитием технологии КМОП СБИС с обновлением оборудования через каждые 5–6 лет. В настоящее время разработка современных отечественных имплантеров для КМОП СБИС с уровнем технологии 180–90 нм и ниже стала стратегической задачей, поскольку произведенные в конце 80-х годов отечественные имплантеры выработали свои ресурсы и не соответствуют современным требованиям. Проанализированы основные узлы и системы современных ионных имплантеров, выбраны наиболее перспективные направления разработок.

Ключевые слова: ионная имплантация; имплантер; КМОП; СБИС; ИМС.

Ионная имплантация используется при изготовлении современных полупроводниковых приборов (ППП) и интегральных микросхем (ИМС) на основе элементарных металл-оксидных полупроводниковых структур (КМОП) как основной способ создания сверхбольших интегральных схем (СБИС) с субмикронными уровнями технологии (УТ) [1]. Процесс ионной имплантации позволяет точно управлять профилем концентрации и латеральным распределением легирующих примесей при создании физической структуры приборов, соответствующих современным уровням технологии производства ИМС.

Процесс также возможно адаптировать к техническим требованиям производства полупроводниковых ИМС не только на основе кремния, но и на основе других материалов (A^3B^5 , A^2B^6 , SiC и др.). Метод ионной имплантации обеспечивает множество степеней свободы при обработке (при производстве ИМС с нанометровым уровнем технологии число процессов имплантации достигает 45), что позволяет быстро внедрять новые интегрированные технологии, которые возникают при масштабировании ИМС.

В 2023 году при поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации были начаты работы по разработке и изготовлению комплекта установок ионной имплантации (шифр «Имплантер»). На сегодняшний день разработаны компоновочные схемы и решены технические проблемы, позволяющие перекрыть весь диапазон требований к установкам имплантации по величине токов, расширенному диапазону сепарируемых масс (до 120 а.е.м.) и энергий (однозарядных ионов) всего двумя моделями: среднеточковый Имплантер — диапазон энергий от 0,2 до 270 кэВ и высокоэнергетический Имплантер — диапазон энергий от 10 до 1000 кэВ, что достигается оригинальным решением ускоряющей/замедляющей системы ионно-оптического тракта. Превосходящие зарубежные аналоги



по токовым и габаритным параметрам характеристики высокоэнергетического Имплантера достигаются путем использования высоковольтного ускорителя ионов с элегазовой изоляцией высоковольтного терминала [2].

Конструктив процессной камеры и транспортной системы загрузки/выгрузки пластин универсален как для среднетокковой, так и для высокоэнергетической моделей Имплантеров и будет обеспечивать механическую производительность до 400 пластин диаметром 200 мм в час из SMIF контейнеров, а также будет предусмотрена возможность работы с пластинами диаметром 100 и 150 мм. Для проведения непосредственно процесса легирования предполагается оснащение процессной камеры оригинальным манипулятором рабочего стола с электростатическим прижимом пластин и углами наклона $\pm 60^\circ$ по двум координатам и углом вращения пластины 360° . Разрабатываемая конструкция будет обеспечивать минимальное распыление элементов ионным пучком в процессе легирования, пониженный уровень привносимой дефектности и требуемый уровень однородности легирования. В состав оснащения процессной камеры также включаются электростатический фильтр финишной очистки, компенсатор поверхностного заряда пластины на основе СВЧ-разряда и система непрерывного мониторинга ионного пучка в процессе легирования.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — 800 с.
2. Авдиенко А. А. Диссертация «Физико-технические принципы построения и применения высокоэнергетичных ионных имплантеров». — Москва, 2004.

УДК 621.389

Статус работ по Инжектору для ТМ-200Т

Старостенко А. А.¹, Авдиенко А. А.², Вахрушев Р. В.¹, Девятайкина Т. А.¹,
Докутович В. А.¹, Драничников А. Н.¹, Константинов С. Г.¹, Краснов А. А.¹,
Кремнев Н. С.¹, Лопаткин И. А.¹, Орешонок В. В.¹, Рыбickaя Т. В.¹,
Рябченко К. К.¹, Семенов Е. П.¹, Сеньков Д. В.¹, Скляров В. Ф.¹, Сорокин А. В.¹,
Стешов А. Г.¹, Субаев Е. А.¹, Усов П. В.¹, Цыганов А. С.¹, Чуркин И. Н.¹,
Шнянков С. В.¹

¹ *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

² *АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10*

В докладе представлено состояние расчетов, проектирования, конструирования и производства Инжектора установки ионной имплантации ТМ-200Т.



УДК 621.3.049.774

Конструктивные особенности специального технологического оборудования для производства КМОП СБИС с технологическими нормами 45 нм и менее

Смирнов А. А., к. ф. -м. н.

ООО «НМ-Тех»

*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а
asmirnov@nm-tech.org*

Разработан обзор конструктивных особенностей специального технологического оборудования (СТО) для производства КМОП СБИС на пластинах 300 мм и выдвигаются предложения по поэтапной локализации функциональных модулей, материалов и компонентов технологического оборудования и вспомогательных систем.

Ключевые слова: специальное технологическое оборудование; КМОП СБИС; обратный инжиниринг; реинжиниринг.

Современное технологическое оборудование для производства передовых КМОП СБИС — это результат многолетнего развития конструкторских и технических решений крупнейшими мировыми производителями, которые, фактически, являются монополистами в своих направлениях. Санкционное давление со стороны недружественных стран формирует для российских производителей микроэлектроники вызовы, которые можно разделить на две основные категории:

- 1) поддержание в рабочем состоянии импортного оборудования, для которого существуют ограничения в части сервисных услуг и запасных частей;
- 2) модернизация и создание новых производственных линий в целях технологического развития.

Задача поддержания импортного СТО в рабочем состоянии частично решается путем обратного инжиниринга (реинжиниринга) модулей и блоков. Реинжиниринг позволил разработать конструкторскую документацию на дорогостоящие компоненты СТО, часть из которых уже изготавливаются на российских предприятиях. В настоящий момент, это изделия из жаростойких материалов (вольфрам, молибден, графит, нержавеющая сталь, кварц), ионообменные фильтры, пьедесталы для виброзащиты СТО, баллоны для специальных газов ионного легирования, соответствующие самым современным стандартам. Номенклатура изделий, изготовленных в рамках реинжиниринга, планомерно расширяется, ведется разработка электронных блоков, НЕРА-фильтров, компонентов внутрикамерной оснастки.

В части модернизации и создания технологических линий под пластины диаметром 300 мм наиболее проблемными направлениями являются оборудование жидкостной химической обработки, магнетронного напыления и атомно-слоевого осаждения многослойных структур, а также оборудование для автоматизированного поиска дефектов с высоким разрешением. Развитие этих направлений может осуществляться силами отечественных машиностроительных предприятий, при этом важно учитывать лучшие конструкторские и технические решения, реализованные в импортном оборудовании. В частности, архитектура современного СТО позволяет эффективно использовать площадь чистых производственных

помещений за счет выноса периферийного оборудования на технический этаж и построения СТО «в высоту», технологическая гибкость и высокая производительность достигаются за счет применения кластерной концепции СТО, когда на общей транспортной системе устанавливается несколько технологических модулей. Для экономии ресурсов производители могут объединять усилия путем разработки и производства унифицированных модулей, таких, например, как атмосферный транспортный модуль (FI — Factory Interface), применяемый на всех типах СТО для загрузки/выгрузки 300 мм пластин, или унифицированные АСУ (автоматические системы управления). Также необходимо предусматривать возможность конверсии оборудования из 300 мм в 200 мм.

Реинжиниринг компонентов импортного оборудования и развитие отечественной индустрии современного СТО — неотъемлемые условия дальнейшего развития российской микроэлектроники.



УДК 54.053, 62-523.6

Разработка и производство физико-термического оборудования для получения материалов и структур ЭКБ

д. т. н. Бородин А. В., чл.-корр. Бородин В. А., к. ф.-м. н. Веретенников А. В.,
к. ф.-м. н. Францев Д. Н., к. ф.-м. н. Юдин М. В.

АО «ЭЗАН»

142232, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 9

АО «ЭЗАН» разрабатывает и производит широкий спектр автоматизированного оборудования для выращивания монокристаллов и тонких пленок, а также термической обработки материалов для нужд радиоэлектронной промышленности. В рамках решения задач импортозамещения освоено производство кастомизированных вакуумных камер и элементов вакуумной техники для электронного машиностроения и научного приборостроения.

Ключевые слова: автоматизированное оборудование для выращивания монокристаллов; физико-термическое оборудование; эпитаксиальное оборудование; вакуумная техника; электронное машиностроение.

Физико-термическое оборудование является важной составляющей производственной линейки для микроэлектроники. Оборудование применяется как для синтеза технологически важных и перспективных материалов (рост кристаллов, высокотемпературный синтез, жидкофазная и газовая эпитаксии, спекание и т.д.) так и для проведения процессов диффузии, окисления и отжига. В настоящее время наблюдается устойчивое увеличение объема российского рынка физико-термического оборудования, в первую очередь, за счет импортозамещения и развития собственных производств ЭКБ.

АО «ЭЗАН» осуществляет разработку и производство автоматизированного оборудования для выращивания кристаллов, а также физико-термического оборудования для получения и обработки материалов. Проектирование нашего оборудования и разработка систем автоматического управления проводится на основе результатов изучения тепло и массопереноса, полученных на основе решения глобальных численных моделей физико-термических процессов, включая не стационарные. Специалистами предприятия создаются цифровые двойники оборудования и процессов, проводятся виртуальные испытания разрабатываемой продукции [1–10].

АО «ЭЗАН» имеет значительный опыт разработки и поставок оборудования для выращивания различных монокристаллов методами Чохральского, Киропулоса, Степанова как на российские предприятия, так и на международный рынок — в Южную Корею, Тайвань, Китай, Швейцарию, Италию, Турцию и др. Оборудование АО «ЭЗАН» используется для выращивания монокристаллов тугоплавких оксидов (сапфир Al_2O_3 , ниобат лития $LiNbO_3$, алюмоиттриевый гранат $Y_3Al_5O_{12};Nd$ и пр.), ортосиликата лютеция (LYSO), калий-гадолиниевого вольфрамата (KGW:Nd), антимонида индия (InSb), кремния (Si), особо чистого германия (Ge), а также для вакуумной дистилляции редкоземельных металлов и др.

В настоящее время АО «ЭЗАН» реализует комплексные проекты по разработке и освоению в производстве оборудования для выращивания оксида галлия (Ga_2O_3), карбида кремния (SiC), которые необходимы для получения подложек для мощной

и высокочастотной электроники. В 2024 году предприятие приступило к разработке установки эпитаксии карбида кремния на подложках диаметром до 150 мм методом химического газофазного осаждения (CVD).

Литература

1. Бородин А. В., Бородин В. А., Францев Д. Н., Юдин М. В. Адаптивные автоматизированные системы управления процессами выращивания монокристаллов методами Чохральского, Степанова (EFG) и Киропулоса с использованием датчика веса // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2022. — № 1. — С. 96–101.
2. Патент РФ № 154177 «Транзисторный преобразователь частоты для индукционного нагрева с линейной регулировочной характеристикой выходной мощности».
3. Патент РФ № 151311 «Транзисторный преобразователь с быстрым автоматическим перезапуском».
4. Патент РФ № 113070 «Масс-спектрометр и отклоняющаяся магнитная система».
5. Патент РФ № 2451117 «Устройство для выращивания профилированных кристаллов в виде полых тел вращения».
6. Патент РФ № 2555481 «Установка для выращивания монокристаллов сапфира методом Киропулоса».
7. Патент РФ № 2560395 «Способ автоматического управления с обратной связью процессом выращивания монокристаллов методом Киропулоса».
8. Бородин А. В., Юдин М. В., Францев Д. Н. Виртуальный тепловой узел для численного исследования процесса выращивания профилированных кристаллов сапфира // Научное приборостроение, 2017. — Т. 27. — № 3. — С. 70–80.
9. Borodin A. V., Borodin V. A. Numerical simulation of the distribution of individual gas bubbles in shaped sapphire crystals // Journal of Crystal Growth, 2017. Vol. 478. P. 180–186.
10. Бородин А. В. др. Фабрика будущего по разработке и производству кастомизированной вакуумной техники для научного приборостроения и высокотехнологичных отраслей промышленности // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции Научное приборостроение: современное состояние и перспективы развития, 2018, г. Казань. — С. 80.



УДК 621.382

Исследования однородности температуры подложки в установке вакуумно-плазменного травления

Горностаев П. А.

АО «НПП «ЭСТО»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 1

Проведены экспериментальные исследования однородности температуры подложки в установке вакуумно-плазменного травления, закрепленной на подложкодержателе с электростатическим прижимом, при различных параметрах плазменной обработки. Проведен анализ различных механизмов теплообмена в системе плазма-подложка-подложкодержатель.

Ключевые слова: вакуумно-плазменное травление; подложкодержатель с электростатическим прижимом; равномерность температуры подложки.

Процессы вакуумно-плазменного травления (ВПТ), широко используются в производстве изделий микро- и нанoeлектроники, микро- и наномеханических устройств [1–6]. Данные процессы применяются для финишной очистки поверхности подложек, планаризации их поверхности, удаления резиста, изготовления тонких неорганических масок, формирования элементов интегральных микросхем (ИМС) [7].

При производстве ИМС оборудование ВПТ подразделяют в зависимости от видов материалов, подлежащих травлению: травление кремния, травление металлов и травление диэлектриков. Травление кремния и металла требует оборудования с низкой энергией ионов, поскольку ковалентная связь в данных материалах относительно слабая. Для травления диэлектриков требуется оборудование с высокой энергией ионов, из-за прочной ковалентной связи данных материалов. Применение новых материалов в структурах ИМС, приведенная выше классификация расширяется.

Количество процессов ВПТ во всем производственном цикле ИМС демонстрирует тенденцию к росту. Таким образом, оборудование для ВПТ составляет все большую долю от общих затрат на оборудование производственной линии. Среднее количество технологических операций и процессов ВПТ при изготовлении ИМС для различных уровней технологии приведены в табл. 1 [8, 9].

Таблица 1. Среднее количество технологических операций и процессов ВПТ при изготовлении ИМС для различных уровней технологии

Уровень технологии	65 нм	45 нм	32 нм	20 нм	14 нм	10 нм	7 нм
Среднее количество процессов ВПТ	20	30	40	55	65	110	150
Среднее количество технологических операций	680	710	740	1000	1100	1300	1500

С развитием полупроводниковых технологий, требования к технологическим процессам определяют необходимость значительного повышения разрешающей способности ВПТ (например ширина линий логических устройств уже

составляет 3 нм) [8]. Появляются новые структуры (например NAND, FinFET, GAAFET, MBCFET, MOSFET), новые материалы (например материалы с высокими и низкими показателями диэлектрической проницаемости (high-k, low-k, ultralow-k)) и новые технологии (например процессы Dual Damascene и multiple patterning) [8, 10, 11].

Таким образом, требования к процессам ВПТ сосредоточены на следующих аспектах: более точный контроль параметров травления; более высокая селективность травления; оптимизация технологии травления структур с высоким аспектным соотношением; сведение к минимуму повреждений устройств, вызванных плазмой. Переход к нанометровым размерам требует создания принципиально новых технологических методов и оборудования, обладающих высокой разрешающей способностью. В этой связи задачи исследования и оптимизации процессов ВПТ важны и актуальны для развития полупроводниковых технологий.

Литература

1. Сипов А. А. Разработка технологии высокоскоростного глубокого плазмохимического травления монокристаллического кварца, карбида кремния и ниобата лития при малой мощности. — 2019.
2. Амиров И. И. Плазменные процессы формирования высокоаспектных структур для микро- и наномеханических устройств. Дисс. Физико-технический институт РАН (ФТИАН). — 2010.
3. Зотович А. И. Деградация нанопористых диэлектриков в высокочастотной плазме и методы ее снижения. — 2018.
4. Данилкин Е. В. Исследование и оптимизация процесса реактивного ионного травления деплот в кремнии для формирования мелкой сеточной изоляции. — Дисс. Московский государственный институт электронной техники, 2008.
5. Коняев И. В. Кинетика и механизмы плазмохимического травления тантала лития. — Дисс. Воронежский государственный технический университет, 2019.
6. Спешилова А. Б. Разработка технологии формирования пленок фоторезиста прецизионной толщины с минимальной шероховатостью поверхности методом плазмохимического травления. — 2019.
7. Нанотехнологии в электронике. Вып. 2. Под редакцией члена-корреспондента РАН Ю. А. Чаплыгин. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2013. — 688 с.
8. Pu Y. Plasma Etch Equipment. In: Wang, Y., Chi, M.H., Lou, J.J.C., Chen, C.Z. (eds) Handbook of Integrated Circuit Industry. Springer, Singapore, 2024.
9. Киреев В. Ю. Введение в микроэлектронику и нанотехнологии. — 2008.
10. Орлов А. А. и др. Диэлектрический барьер в субтрактивном процессе формирования системы металлизации меди. — 2022.
11. Хорин И. А. Технологии электронных компонентов: Учебник. — Саратов: ИПР Медиа 278. — 2018.



УДК: 672.81.05

Термическое оборудование для микроэлектроники, оптики, и фотоники

Челапкин Д. Г., Корячко В. В., Трактирщиков В. С., Стройкин А. Е., Черкунов В. И.

АО «НПП «ЭСТО»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 1

chelapkin@yandex.ru

Необходимость термического, отечественного оборудования для проведения базовых технологических процессов для целей оптики, фотоники и микроэлектронной промышленности. Описаны сложность и необходимость освоения производства и технологических процессов термического оборудования.

Ключевые слова: микроэлектроника; оптика; фотоника; термическое оборудование; диффузионные печи; толстый оксид.

АО «НПП «ЭСТО» начинает работу по изучению и разработке термического оборудования для микроэлектроники, фотоники и оптики.

Отсутствие отечественного производства оборудования, включающего само оборудование, оснастку, реакторы, ПО, а также ограниченные возможности импорта подобных устройств создают в России значительные трудности для развития отечественной микроэлектроники. Термо-оборудование является неотъемлемой частью производства микроэлектроники и активно используется в различных технологических процессах.

Основываясь на критической необходимости этого оборудования, возникла неотложная потребность в разработке аналогичных технологий на территории России. Такое импортозамещение станет ключевым шагом в поддержании производственного процесса и развитии национальной технологической базы, способствуя снижению зависимости от зарубежных поставок.

УДК 621.3

Проблемы и перспективы производства технологического оборудования для предприятий микроэлектронной промышленности России

Фролов Г. Ю.*ООО «ТБС»**105064, г. Москва, Нижний Сусальный пер., 5, стр. 4**frolov@tbs-semi.ru*

Сложно недооценить важность создания производства отечественного технологического оборудования для предприятий микроэлектронной промышленности в России. Учитывая рост спроса на оборудование со стороны отечественного рынка, проблем с поставками импортного оборудования и материалов, а также усиливающейся глобальной конкуренции рассматриваются вызовы, с которыми сталкиваются отечественные производители оборудования для нужд производства микроэлектронной продукции, такие как сложности подбора и квалификации отечественных производителей высокотехнологических материалов, не всегда эффективные системы государственной поддержки и высокие издержки производства. Обсуждается необходимость адаптации оборудования под специфические нужды отечественного заказчика и внедрения инновационных процессов для улучшения качества, и конкурентоспособности продукции, произведенной в Российской Федерации. В то же время подчеркиваются перспективы роста отрасли с участием государственной поддержки, развития центров научных компетенций и внедрения передовых технологий.

Ключевые слова: микроэлектроника; производство; оборудование для микроэлектроники; государственная поддержка; полупроводники; инвестиции.

В ходе доклада рассматриваются основные сложности в отрасли.

1. Ограничение доступа к передовому импортному оборудованию.
2. Особенность отечественного рынка микроэлектроники, где в первую очередь необходимо оборудование для небольших серий и исследовательских применений.
3. Зависимость от импорта оборудования и материалов, что делает производство уязвимым к различным экономическим и политическим рискам.
4. Высокие издержки на разработку оборудования и материалов для микроэлектроники и открытия чистого производственного помещения требуют значительных инвестиций, которые не всегда доступны для отечественным компаниям.
5. Высокая наукоемкость сферы, где требуется привлечение высококвалифицированных кадров, и необходимы затраты на создание научно-исследовательских центров.

На собственном опыте производства оборудования, делаются выводы о важности развития производства технологического оборудования в стране. Необходимости увеличение мер государственной поддержки и инвестиций, развития инновационной инфраструктуры, привлечение молодых талантливых специалистов.



УДК 621.382

Разработка установки электронно-лучевой литографии

Лебедева Н. И.

АО «НПП «ЭСТО»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 1

Описывается устройство разрабатываемой установки электронно-лучевой литографии с минимальными размерами элемента 150 нм. Указаны основные технические характеристики.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография.

Актуальность разработки установки электронно-лучевой литографии связана с отсутствием в России собственного специального технологического оборудования для реализации процессов литографии, которые являются движущей силой нано- и микроэлектроники, определяющей информационную безопасность страны и прогресс во всех отраслях науки и техники.

На сегодняшний день наше предприятие в рамках СЧ ОКР «Разработка установки электронно-лучевой литографии с проектными нормами 150 нм» занимается разработкой системы, имеющей средние технические характеристики по сравнению с мировыми аналогами. Минимальный размер элемента в резисте — 150 нм. Такая установка сформирует реальный практический опыт разработки и изготовления данного класса оборудования.

Установка состоит из основного прибора и периферийных устройств. В периферии находятся системы питания и управления, откачные средства, термостаты. В основном приборе электронно-оптическая система и вакуумная механизированная платформа.

В состав вакуумной механизированной платформы входят: вакуумная камера, шлюз, вакуумная система, манипулятор, стол координатный, интерферометр, лазер, привод стола координатного и откачные средства. Электронно-оптическая система размещается на крышке вакуумной камеры. Система состоит из излучателя с катодом, элементов электронной оптики и диафрагм. В состав элементов электронной оптики входят магнитные линзы, магнитные отклоняющие системы, стигматы, электростатические отклоняющие системы.

Технические характеристики разрабатываемой установки электронно-лучевой литографии представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики разрабатываемой установки электронно-лучевой литографии

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Ускоряющее напряжение	20 кВ
2	Максимальная плотность тока в плоскости обрабатываемого объекта	3 А/см ²
3	Материал катода источника электронов	LaB ₆
4	Максимальный размер рабочего поля	3,2×3,2 мм

№ п/п	Характеристика	Значение
5	Максимальный размер рабочего подполя	200×200 мкм
6	Размер электронного луча регулируемого формата	$a \leq 0,2$ мкм $b \leq 6,3$ мкм
7	Шаг регулировки формата электронного луча	0,1 мкм
8	Метод сканирования электронным лучом	Векторный
9	Полезный диапазон перемещения стола прецизионного	162×162 мм
10	Точность позиционирования стола прецизионного	не более 5 мкм
11	Разрешение лазерной интерферометрической системы измерения перемещений стола прецизионного	0,02 мкм
12	Максимальная скорость перемещения стола прецизионного	20 мм/с
13	Стратегия экспонирования	Шаговая мультипликация структур
14	Габариты обрабатываемых фотошаблонных заготовок	127×127×2,24 мм (5009) 152×152×6,35 мм (6025)
15	Способ загрузки фотошаблонных заготовок	Загрузка магазина в шлюзовую камеру, автоматическая перегрузка объектодержателей из магазина в рабочую камеру и обратно
16	Поддерживаемые форматы файлов	GDSII, DXF, OASIS



УДК 681.723.74

Двухэтапная фотоэлектронная литография для работы с хрупкими наноструктурами

Мартанов С. Г., Таркаева Е. В., Ивлева В. А., Кунцевич А. Ю.

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

alexkun@lebedev.ru

При создании наноструктур из хрупких объектов (двумерных материалов, нанотрубок) необходимо проводить некоторое количество литографий, что пагубно влияет на состояние объекта. Большинство электронных резистов допускают также засветку ультрафиолетовым светом. В настоящей работе мы демонстрируем поочередную засветку и литографию в одном резисте при помощи электронного литографа (мелкие элементы) и ультрафиолета (крупные элементы).

Ключевые слова: фотолитография; электронная литография; наноструктуры.

Одним из основных процессов при изготовлении наноструктур является литография. Если объект достаточно хрупкий, то каждое снятие-нанесение резиста увеличивает риск потери или повреждения порой сложной структуры. Наилучшего пространственного разрешения засветки в лабораторных условиях добиваются при помощи электронной литографии, однако такая точность необходима, как правило, для экспонирования лишь малой области, тогда как для изготовления внешних элементов, например подводящих электродов с контактными дорожками, достаточно гораздо более дешевой и быстрой фотолитографии. Поскольку большинство электронных резистов на основе полиметилметаакрилата (PMMA) допускают также засветку ультрафиолетовым светом, потенциально можно уменьшить количество циклов работы с резистом, засвечивая один резист поочередно ультрафиолетом и электронами [1].

Поскольку для большинства лабораторных задач достаточно экспонировать сравнительно малую область — до нескольких квадратных сантиметров, прибор для оптической дозасветки может быть изготовлен достаточно просто на основе микроскопа. На основе самодельного микроскопа [2] с манипулятором мы разработали установку для совмещения контактных масок [3] с возможностью ультрафиолетовой засветки, а также сами маски на основе кварца прозрачного в УФ-диапазоне. Фактически, данный прибор является уменьшенной лабораторной версией установок совмещения-экспонирования. Вся установка умещается на оптической плите размером 300×200 мм. Экспонирование производится стандартной ртутной лампой. В отсутствие оптимизации схемы засветки удается получить разрешение 5 мкм в оптической литографии при сопоставимой точности совмещения на пластине размером до 2×2 см².

Разработанные решения являются естественным дополнением к электронному литографу и расширяют возможностей лабораторий, работающих в области наноструктур.

Литература

1. Carbaugh D. J. et al. Combination photo and electron beam lithography with polymethyl methacrylate (PMMA) resist // *Nanotechnology*, 2017. 28, 455301.
2. Кунцевич А. Ю., Простой подвижный металлографический микроскоп высокого увеличения // *Приборы и техника эксперимента*, 2021. — Т. 5. — С. 156–158.
3. Pugachev M. V., Duleba A. I., Galiullin A. A., Kuntsevich A. Y. Micromask Lithography for Cheap and Fast 2D Materials Microstructures Fabrication // *Micromachines*, 2021. 12 (8). 850. URL: <https://doi.org/10.3390/mi12080850>.



УДК 621.79.02

Особенности СТО для процессов жидкостной химической очистки и травления в передовых технологиях 45 нм и менее

Шерметова М. А.

ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а
Shermetova@nm-tech.org

Жидкостная химическая обработка представляет собой важный этап производства КМОП-микросхем и составляет до 25% от общего количества операций в передовых технологических маршрутах. Классическое оборудование ванного типа обладает высокой производительностью, отличается простотой конструкции и обслуживания. При переходе к техпроцессам 45 нм и менее оборудование индивидуальной обработки превосходит оборудование ванного типа в гибкости технологического процесса и достижимой чистоте, однако, в силу санкционных ограничений является труднодоступным.

Ключевые слова: специальное технологическое оборудование; жидкостная химическая обработка; КМОП СБИС.

Классическим методом мокрой обработки является групповая обработка пластин в установках ванного типа. Лидерами по производству оборудования групповой жидкостной химической обработки являются японские компании TEL и SCREEN. Например, установки SCREEN FC-3000 и FC-3100 являются мировым стандартом оборудования ванного типа в силу следующих преимуществ [1]:

- высокая производительность;
- возможность работы с высококонцентрированными и высокотемпературными реагентами;
- минимизация перекрестного загрязнения пластин;
- минимизация загрязнения пластин ионами металлов;
- предотвращения образования водяных знаков;
- сохранение толщины оксидной пленки в процессе обработки.

В середине 2000-х в индустрии начался переход от оборудования групповой обработки ванного типа к оборудованию индивидуальной обработки центрифужного типа производства компаний LAM, TEL и SCREEN. Индивидуальная обработка пластин обладает рядом преимуществ по сравнению с групповой обработкой в ваннах [2]:

- гибкость и высокая контролируемость процесса;
- высокая равномерность травления;
- возможность использования различных реагентов в одной камере;
- меньшая занимаемая оборудованием площадь.

По нашей оценке, ванное оборудование может применяться в производстве КМОП в маршрутах с технологическими нормами 65–55 нм. При переходе к техпроцессам 45 нм и менее только оборудование индивидуальной обработки способно обеспечить весь набор необходимых технологических операций и высокий выход годных изделий. Отечественное оборудование как групповой, так и индивидуальной обработки отсутствует, при этом оборудование ведущих иностранных компаний попадает под санкционные ограничения, его эксплуатация затруднена

из-за проблем поставки запчастей, отсутствия официального сервиса и заблокированной конфигурации управляющего программного обеспечения.

Опыт КНР показывает возможность разработки собственного оборудования ЖХО. Например, одна из китайских компаний за 6 лет разработала и вывела на внутренний рынок решения для базовых технологических процессов групповой и индивидуальной обработки. Оборудование сконструировано путем реинжиниринга и построено на стандартных компонентах европейских и японских производителей с использованием АСУ собственной разработки. При этом компания следовала концепции разработки оборудования под пластины 300 мм, как приоритетной, с возможностью быстрой конверсии под пластины 200 мм. Необходима разработка отечественного оборудования жидкостной химической обработки индивидуального типа под пластины диаметром 300 мм.

Литература

1. SCREEN Semiconductor Solutions Co., Ltd. Company profile. URL: <https://www.screen.co.jp/spe/en/products/fc-3100>.
2. Kruwinus H., Oyrer H. Better productivity and faster cycle times through single wafer processing // Semiconductor Fabtech, 2000. Vol. 12. P. 299–301.



УДК 621.3

Плазменное травление в передовых КМОП-технологиях: эволюция оборудования

Борисов В. Ю.

ООО «НМ-Тех»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 7

Выделены ключевые конструктивные особенности камер вакуум-плазменного травления частей технологического маршрута FEOL и MOL для критических уровней технологии. Определен вектор развития крупнейших компаний-производителей оборудования плазменного травления.

Ключевые слова: плазма; реактор; ICP; CCP; вакуум; травление.

На сегодняшний день лидерские позиции в производстве оборудования плазменного травления занимают три компании-гиганта полупроводникового машиностроения: LAM Research (USA), Applied Materials (USA), Tokyo Electron (Japan). Касательно способа транспортировки пластин внутри оборудования, перечисленные выше компании объединяет переход к кластерной системе с возможностью подключения нескольких (не менее четырех) процессных камер и наличием атмосферного и вакуумного транспортных модулей, соединенных модулями откачки/накачки давления. Кластерная система обеспечивает высокую пропускную способность оборудования и дает возможность объединения различных технологических модулей на одной платформе.

В части FEOL технологического маршрута производства микросхем широкое распространение получили реакторы плазменного травления типа ICP, представляющие из себя планарные двухэлектродные реакторы, верхним электродом которых является катушка индуктивности. Соответствие требованиям, предъявляемым к процессам плазменного травления изоляции, затворов и пристенков в передовых КМОП-технологиях возможно за счет тонкой подстройки операционных параметров процесса и внедрения следующих конструктивных особенностей в устройство камеры:

- 1) сегментированный верхний электрод и система распределения мощности;
- 2) инжектор с возможностью регулировки направления газового потока;
- 3) многозонный электростатический прижим с функцией регулировки температуры;
- 4) наличие системы быстрого переключения газа для атомно-слоевого травления;
- 5) импульсный режим подачи мощности на нижний электрод.

В части MOL технологического маршрута производства микросхем преобладают CCP-реакторы, ВЧ мощность в которых подается на две плоскопараллельные пластины. Ключевыми конструкторскими особенностями таких реакторов являются:

- 1) безинжекторная система подачи газа, задействующая газовый душ в качестве распределителя;
- 2) возможность настройки межэлектродного расстояния без необходимости вскрытия камеры;

- 3) технология ограничения объема плазмы при помощи системы кварцевых/керамических колец;
- 4) несколько (два и более) генераторов, подключенных к нижнему электроду;
- 5) DC-смещение, приложенное к верхнему электроду.

Для плазменного снятия фоторезиста применяются микроволновые реакторы или реакторы типа ICP. В случае ICP генерация плазмы осуществляется за счет подачи мощности на катушки индуктивности, окружающие колбы из диэлектрического материала с высокой диэлектрической проницаемостью. В микроволновых реакторах генерация активных частиц происходит при помощи магнетронного усилителя. Процессы снятия фоторезиста высокотемпературные ($>200^{\circ}\text{C}$), не требующие наличия электростатического прижима. Пространство камеры отделяется от области генерации плазмы системой ионных ловушек, не позволяющих заряженным частицам достигать поверхности пластины. В отличие от камер реактивного ионного травления, являющихся камерами индивидуальной обработки, в оборудовании плазмохимического снятия фоторезиста широко применяются камеры обработки двух пластин одновременно.

Все типы камер плазменного травления требуют периодического обслуживания и замены частей внутрикамерной оснастки. Поиск и доставка ЗИП в условиях санкционного давления являются проблемами, препятствующими своевременному обслуживанию установки и непрерывному процессу производства. Для реализации программы развития электронной и радиоэлектронной промышленности в России необходимо развивать электронное машиностроение, учитывая опыт и технологические наработки крупнейших мировых компаний-производителей оборудования.



УДК 658.589

Модернизация вакуумных установок магнетронного и терморезистивного напыления

Крылов М. Л.

ООО «САВТЭК»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4922, 4, стр. 5, ком. 50

krylov@savtech.ru

Разработана технологическая платформа для производства модернизированных установок вакуумного нанесения покрытий. Приведены характеристики и краткое описание основных систем и узлов оборудования.

Проведен анализ основных функциональных и технических изменений.

Ключевые слова: магнетронное напыление; УВН; модернизация; вакуумное оборудование; технологическое оборудование.

На большинстве российских микроэлектронных производств для проведения технологических процессов вакуумного напыления использовались установки типа УВН-71, УВН-74, РЭ-70, ВУ-1, ВУ-2, Оратория, разработанные еще во времена Советского Союза [1]. В силу морального и физического износа, сложилась острая необходимость замены этих установок на современные без ущерба для отлаженных технологических процессов.

Задачей глубокой модернизации оборудования является не только усовершенствование механизмов технологических устройств, но и подбор оптимальной конфигурации с точки зрения экономической целесообразности проекта, которая будет соответствовать новым технологическим укладам России. Актуальность проекта как правило оценивается тремя параметрами: бюджет, сроки реализации и результативность.

Модернизация напылительных установок магнетронного и резистивного типа позволяет:

- 1) расширить функциональное назначение установки;
- 2) увеличить производительность (в том числе объем загрузки);
- 3) улучшить технические и массогабаритные характеристики самой установки;
- 4) создавать на одной платформе комбинированные установки магнетронного и терморезистивного напыления;
- 5) интегрировать высокоточные измерительные и аналитические приборы.

Переформатировать функциональное назначение установки с терморезистивного на магнетронное возможно путем изменения внутрикамерной архитектуры.

Конструктивные особенности модернизированных установок

- 1) Все технологические узлы и блоки размещены в едином корпусе (унификация узлов и агрегатов);
- 2) отсутствуют выносные элементы и системы;
- 3) возможность размещения оборудования внутри или встраивания в чистые помещения.

Вакуумная система

- 1) Современная высокопроизводительная безмасляная откачка;

- 2) D-образная вакуумная камера;
- 3) двойные водоохлаждаемые стенки;
- 4) уровень вакуума до 10^{-4} Па.

D-образная конструкция вакуумной камеры позволяет совмещать несколько типов напыления.

Если технологические узлы располагаются внизу камеры, то появляется возможность нанесения покрытий не только на подложки, но и на оптические изделия. Такую компоновку можно дополнить электронно-лучевой пушкой или использовать магнетроны разной формы.

Карусель также может быть различной формы в зависимости от способа нанесения покрытия [2]:

- полусфера,
- дисковая,
- цилиндрическая,
- планетарная (с переворотом) для двухстороннего напыления.

Технологические узлы и блоки собственной разработки

- 1) ИИ собственного производства;
- 2) кассетная магнитная система с возможностью быстрой замены на другой тип (сбалансированная/ не сбалансированная, а также индивидуальная магнитная система для напыления сплавов и диэлектриков);
- 3) компактные источники питания для резистивного напыления до 1 ГГц.

Автоматизированная система управления

Разработана на базе российского ПЛК Segnetics. ПО собственная разработка программистов САВТЭК.

- 1) позволяет получить повторяемость технологических процессов;
- 2) снизить риск ошибки оператора;
- 3) сохранять и архивировать данные всех техпроцессов;
- 4) проводить анализ всех сохраненных характеристик процессов;
- 5) интегрировать установки в общую систему диспетчеризации предприятия;
- 6) три уровня доступа: оператор, технолог, разработчик.

Трехуровневая система безопасности

- 1) защита оператора;
- 2) защита процесса;
- 3) защита оборудования.

За счет комбинации пассивной электромеханической, логической и программной защиты реализована возможность возобновить техпроцесс после принудительного прерывания или аварийной ситуации.

Кроме этого, в модернизированных установках появилась возможность корректировки рецепта в процессе его исполнения.

Физические параметры

Помимо прочего, модернизация установок нанесения покрытий позволяет увеличить температуру в рабочей камере до 400°C путем применением кварцевых ламп для нагрева. При такой температуре можно существенно расширить линейку технологических процессов, например, можно получить высокоточный резистивный слой или провести отжиг изделия в одном процессе [3].



Выводы

Таким образом, модернизированные установки магнетронного и терморезистивного напыления позволяют обеспечить предприятиям конкурентные преимущества, повышение производительности и качества продукции.

Литература

1. ООО «ГКМП»: официальный сайт. — г. Москва, 2024 г. — URL: <https://gkmp32.com/production/ustanovki-vakuumnogo-napyleniya/ustanovki-vakuumnogo-napyleniya-tipa-uvn-71-uvn-74> (дата обращения: 12.07.2024 г.).
2. Берлин Е. В., Двинин С. А., Сейдман Л. А. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2007. — 176 с. ISBN: 978-5-94836-134-5.
3. Вакуумная техника: [Учеб. для вузов по спец. «Электрон. машиностроение»] / Розанов Л. Н. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Высш. шк., 1990. — 319 с.

УДК 681.121.842

Прецизионная подача жидких реагентов в технологическое оборудование на основе регулятора расхода жидкости

Сажнев С. В., к. т. н., Князев В. И., к. ф.-м. н.

ООО «ЭЛТОЧПРИБОР»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10

Предложена конструкция регулятора расхода жидкости (РРЖ) для подачи жидких реагентов в технологическое оборудование с использованием датчика дифференциального давления. Представлены результаты испытаний РРЖ при регулировании потока жидкости. Показана возможность регулирования подачи жидкости в миллилитровом диапазоне с относительной погрешностью менее 3%.

Ключевые слова: электронный регулятор расхода жидкости; регуляторы Элточприбор.

В электронной промышленности часто возникает задача подачи жидких реагентов в технологическое оборудование в миллилитровом и субмиллилитровом диапазонах расхода. Одним из решений поставленной задачи может служить регулятор расхода жидкости с дифференциальным датчиком давления рис. 1. Физические принципы работы такого регулятора хорошо описаны в литературе [1, 2, 3].

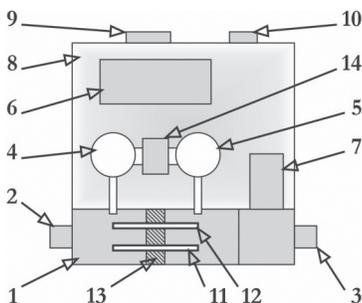


Рис. 1. Устройство РРЖ: 1 — корпус РРЖ; 2,3 — входной и выходной фитинги; 4,5 — входная и выходная камеры датчика дифференциального давления; 6 — плата микроконтроллера; 7 — электромагнитный клапан; 8 — крышка корпуса РРЖ; 9,10 — электрические разъемы; 11, 12 — капилляры; 13 — резиновый диск; 14 — датчик дифференциального давления

Для испытания РРЖ в качестве рабочей среды использовалась деионизированная вода. Схема экспериментальной установки для испытаний регулятора представлена на рис. 2.

Результаты испытаний РРЖ для жидкости представлены в табл. 1 и на рис. 3, 4, 5.

РРЖ позволяет регулировать расход жидкости в диапазоне от 2 до 100% всей шкалы регулятора, что соответствует от 0,28 до 14 г/мин воды.

Из табл. 1 видно, что при регулировании расхода жидкости давление на входе РРЖ не влияет на величину расхода.

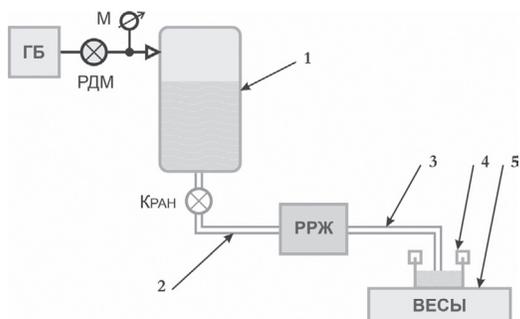


Рис. 2. Схема испытаний РРЖ для жидкости: ГБ — газовый блок с выходным давлением 3,5 бар; РДМ — регулятор давления мембранный; М — манометр давления газа; 1 — бак с деионизированной водой и наддувом сжатым воздухом; 2 — трубка пластиковая длиной 1 м и $\varnothing 6/4$ мм; 3 — трубка пластиковая длиной 2 м и $\varnothing 6/4$ мм; 4 — чаша для взвешивания жидкости; 5 — весы ВЛТЭ-510С; РРЖ — испытываемый регулятор в режиме регулирования расхода жидкости

Таблица 1. Верхний предел регулирования воды Q_{fs} от перепада входного давления $dP_{вх}$

$dP_{вх}$ (бар)	Q_{fs} (г/мин)
0,5	13,78
1,1	13,79
2,1	13,74
3,1	13,74

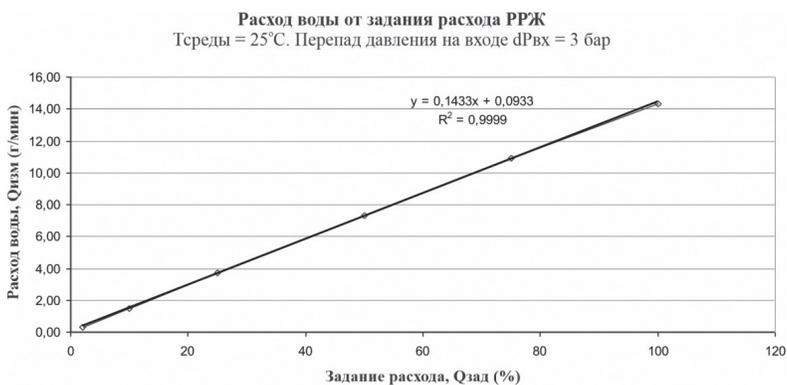


Рис. 3. Калибровочная характеристика РРЖ для воды

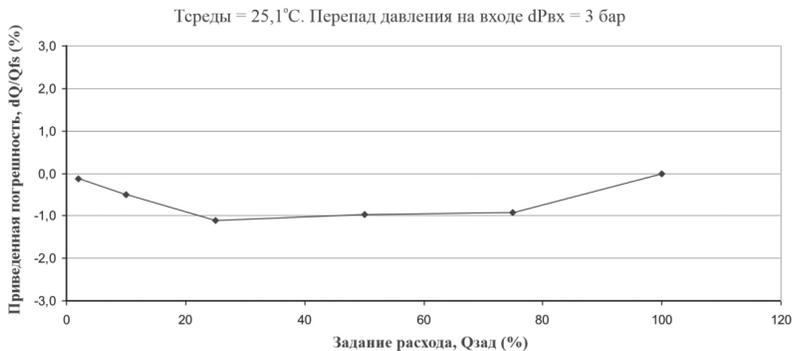


Рис. 4. Приведенная погрешность РРЖ регулирования воды от задания расхода

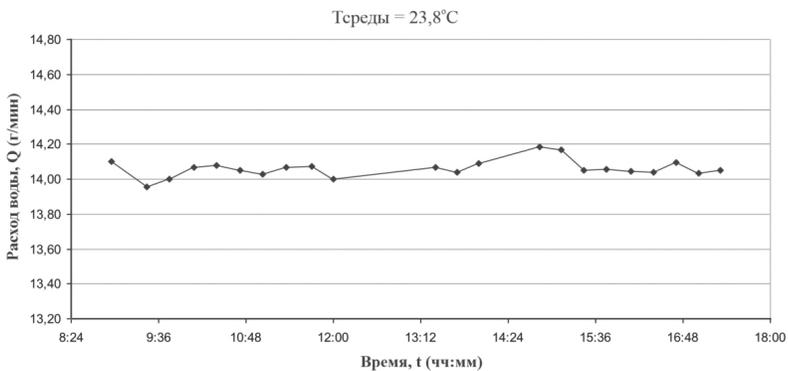


Рис. 5. Расход воды РРЖ от времени при задании расхода Qзад = 100 %

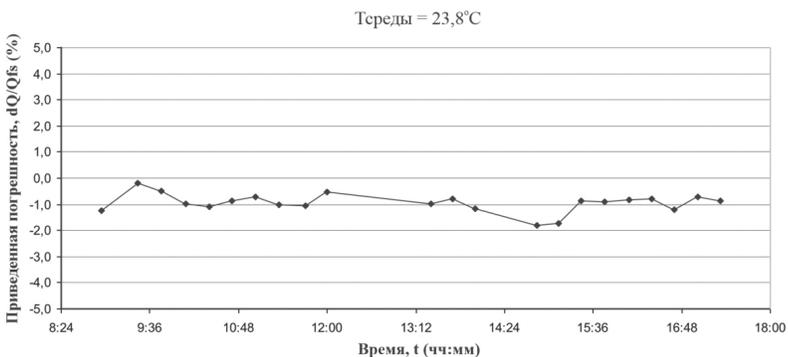


Рис. 6. Приведенная погрешность РРЖ при регулировании воды с заданием Qзад = 100 %



Из рис. 3 и рис. 4 видно, что нелинейность калибровочной характеристики РРЖ для воды не превышает 2%.

Многочисленные измерения приведенной погрешности регулирования РРЖ воды при задании расхода $Q_{зад} = 100\%$ показали, что величина приведенной погрешности на протяжении более 6 часов непрерывной работы РРЖ не превышает 3% (рис. 5 и 6).

Выводы

1. Представлена конструкция РРЖ для подачи жидких реагентов в технологическое оборудование на основе датчика дифференциального давления.
2. Конструкция РРЖ позволяет регулировать расход жидкости таким образом, что расход жидкости не зависит от входного давления.
3. Представленная конструкция РРЖ позволяет регулировать подачу жидкости в технологическое оборудование в диапазоне заданий от 2 до 100% полной шкалы регулятора. Для воды это составляет от 0,28 до 14 г/мин.
4. Нелинейность РРЖ для воды не превышает 2%.
5. Погрешность РРЖ при регулировании воды с заданием 100% на протяжении 6 часов не превышает 3%.

Литература

1. Сажнев С. В., Князев В. И. Прецизионная подача газов в вакуумный реактор технологического оборудования с термокоррекцией внешней среды // Вакуумная наука и техника. Материалы XXVII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым. — Москва, 2020. — С. 123–128.
2. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. — 4-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. — 701 с.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. «Гидродинамика» Теоретическая физика: т. VI (3-е изд., перераб. — М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. — 736 с.

УДК 681.527.2

Технология изготовления контрольно-измерительной оснастки в рамках импортозамещения

Зубарев Р. В., Шугаев Ш. Н., Егшин В. А., Ахметгалиев Р. Ш.

АО «Завод полупроводниковых приборов»

424003, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26

30rz@mail.ru

Одним из самых наиболее эффективных методов проведения испытаний по отбраковке изделий радиоэлектроники является — электротермотренировка (ЭТТ). Под воздействием повышенной температуры окружающей среды в сочетании с электрической нагрузкой, электрорадиоизделия (ЭРИ) за короткий промежуток времени проходят свой «период приработки». Таким образом, все потенциально ненадежные элементы, выявить которые не удастся обычными методами контроля, отбраковываются на этапе ЭТТ. Для контакта испытуемых интегральных микросхем (ИМС) и платы ЭТТ используются устройства контактирующие (УК) и спутник — носители (СН).

Ключевые слова: металлокерамический корпус, спутник-носитель, устройство контактирующее, высокотемпературная керамика, электротермотренировка.

Тренировка фактически ускоряет старение интегральных микросхем (ИМС) и предназначается для выявления ранних отказов, то есть для отбраковки потенциально ненадежных ИМС и повышения надежности партии оставшихся в ней схем. Следовательно, ИМС, выдержавшие тренировку, будут иметь более низкую и постоянную частоту отказов, что значительно повышает надежность радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в которой эти ИМС используются. Разумеется, тренировка интегральных микросхем дает положительные результаты лишь в том случае, когда до и после нее проводится контроль электрических параметров.

ЭТТ является эффективным средством ускорения срабатывания эксплуатационных механизмов отказов. Она дает много информации за короткое время, но достоверные результаты можно получить на основе правильного выбора электрических и тепловых нагрузок, выявления видов и механизмов отказов, соответствующих начальным условиям эксплуатации, а также статистической обработки полученных результатов.

В настоящей работе приведены внешний вид и характеристики изделий, технологии их производства, а также описана оценка требований для подтверждения этих характеристик.

Разработанные и изготовленные в АО «ЗПП» конструкции УК и СН обладают всеми необходимыми характеристиками для получения наиболее точных результатов. Изделия производятся посредством литья пластика под давлением с использованием термопластавтоматов. Материал выводов — бериллиевая бронза, с покрытием золота и никеля. Покрытие выводов УК обеспечивает паяемость без дополнительного облуживания в течение 12 месяцев, а также допускает трехкратную перепайку без нарушения целостности выводов и ухудшения электрических параметров УК. Спутник — носители для интегральных микросхем, содержит основание с гнездом для укладки корпуса микросхемы и пазами для выводов микросхемы, крышку в виде рамки с элементами ее фиксации на основании.



УДК 621.3

Опыт ООО «Совтест АТЕ» в области разработки стендов для проведения электротермотренировки ЭКБ. Модельный ряд стендов

Мальшев Р.А.

ООО «Совтест АТЕ»

305014, г. Курск, ул. Карла Маркса, 135/6

Актуальность проработки темы исследования и разработки стенда ЭТТ обусловлена повышением требований к качеству и надежности электронных компонентов, что определяет необходимость проведения на этапе контроля интегральных микросхем и полупроводниковых приборов дополнительных испытаний, способствующих более полному выявлению потенциально ненадежных изделий. Наиболее эффективным методом таких испытаний, основанных на тепловом воздействии на испытуемое изделие, как в России, так и за рубежом признана электротермотренировка — работа указанных изделий в условиях повышенной (максимально допустимой) температуры и наличия электрической нагрузки.

Основная цель проекта — исследование режима ЭТТ и разработка стенда электротермотренировки.

Частные задачи этого проекта включают в себя:

- исследование метода испытания, его актуальности и первичных требований с учетом специфики российского производства;
- разработка эскизного проекта стенда ЭТТ;
- расчет тепловых режимов работы термокамеры из состава стенда ЭТТ;
- разработка универсальных задающих электронных модулей или так называемой задающей части;
- разработка концепции организации соединения между кассетами и задающей частью.

Российский стандарт который регламентирует проведение ЭТТ — ОСТ 11 073.013 метод 800. Общие технические условия.

Задача проведения ЭТТ отбраковка потенциально ненадежных микросхем на этапе проведения испытаний и вывод на микросхем на плато, т. е. в режим безотказной работы.

Дополнительно стенды ЭТТ могут использоваться для проведения испытаний на безотказность, на воздействие повышенной температуры.

При этом потенциал испытаний на ЭТТ заключается не только в отбраковке, но и в исследовании режима работы изделия весь период испытаний. То есть измерение различных параметров работы и их изменение при выдержке при повышенной температуре.

По опыту свое работы большинство российских предприятий используют свои собственные решения для проведения ЭТТ. Также предприятие имеет опыт поставки и внедрения импортных систем

Импортные решения обладают целым рядом недостатков конечно в контексте российского рынка.

Немаловажный аспект для российского применения — адаптация к существующей оснастке. У большинства производителей скопился достаточный запас таких плат или кассет. Переход на новый тип оборудования потянет за собой переделку всего парка оснастки. Также большинство используют стандартные лабораторные приборы. Это тоже особенность нашего применения ЭТТ и ГОСТ, которые требуют в составе ИО утвержденных типов средств измерений.

Таким образом, можно выделить основные критерии которым должен удовлетворять универсальный стенд для проведения этт

- максимальная универсальность;
- максимальный охват технических характеристик, возможно варьирования параметрами в больших пределах, например контролировать как ток потребления, так и деградацию тока потребления во время проведения ЭТТ;
- быстрая перенастраиваемость;
- простота в освоении оборудования обслуживающим персоналом;
- простота работы.



УДК 621.396.962

Прецизионные измерения фазовых шумов в задачах радиолокации и связи. Решение, разработанное в России

Румянцев К. В.

ООО «РШ Тех»

111250, г. Москва, проезд завода Серп и Молот, 6, корп. 1

kirill.rumyantsev@rsh-tech.ru

Проведен анализ потребностей радиоэлектронной отрасли в решении для измерения фазового шума. Показаны коммерчески доступные, серийно производимые приборы, их базовые характеристики и варианты применения. Представлена новейшая российская разработка — анализатор спектра и фазовых шумов PSA26, превосходящая по характеристикам доступные в текущий момент решения и имеющая высокий потенциал развития. Показаны примеры применения изделия для измерений в области радиолокации, где эффективно решается проблема реализации анализа фазового шума в импульсном режиме.

Ключевые слова: измерение; фазовый шум; импульсная модуляция; анализатор; измерение; радиолокация; связь.

Кратковременная стабильность источника сигнала — один из определяющих показателей качества в передовых системах телекоммуникации и радиолокации. Так, чем ниже уровень фазового шума источника, тем выше пространственное разрешение и точнее результаты измерения скорости движущихся объектов в системах радиолокации. Для систем связи характерно влияние фазового шума на общий динамический диапазон работы приемников, величины утечек в соседний канал, возможности использования высоких порядков цифровой модуляции и т. п.

Современные методики измерения фазового шума позволяют использовать как простые анализаторы спектра, так и более сложные специализированные измерители фазового шума.

Простые анализаторы спектра хорошо применимы в общих производственных задачах, где не требуется достигать уровень чувствительности к фазовому шуму выше, чем характеристики собственного синтезатора, а также, возможно использование только непрерывного режима генерации. Однако, для измерений реальных систем в циклах разработки и производства ключевых предприятий радиоэлектронной промышленности требуется использование методов кросскорреляционной обработки и импульсных режимов измерения, которые характерны для специализированных измерителей фазового шума

На сегодняшний день, при существующих ограничениях импорта решений западного производства, доступ к таким измерителям существенно осложнен.

Компания ООО «РШ Тех» понимая текущие потребности предприятий представляет российскую разработку PSA26 архитектура и методика измерения которой позволяет устранить недостатки, существующие в классических анализаторах спектра, а также позволяющую проводить измерения, как в непрерывном, так и импульсном режиме.

PSA26 — это анализатор спектра и фазовых шумов, который включает в себя базовые возможности спектрального анализа с динамическим диапазоном более 100 дБ, возможность измерения фазовых шумов в непрерывном и импульсном

режимах с чувствительностью лучше, чем -150 дБн/Гц (частота ВЧ 1 ГГц, отстройка 10кГц, режим непрерывной генерации), а так же приложения для анализа параметров импульса и внутримпульсной модуляции ЧМ/ФМ.

Результаты предварительной тестовой эксплуатации показывают возможность применения данного изделия для измерения источников сигнала, используемых в системах радиолокации, спутниковой радиосвязи и других радиоэлектронных устройствах, требующих контроля уровня фазового шума на всех этапах разработки и производства изделия.

Литература

1. Understanding phase noise measurement techniques, Paul Denisowski, Educational note, 10/2021, www.rohde-schwarz.com.
2. Раушер К., Йассен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа / Пер. С. М. Смольского, 2-е издание. — Горячая линия-Телеком, 2014.
3. PSA26, Руководство пользователя.



УДК 621.3

Отечественное лазерное технологическое оборудование

Чехановский Д. С.

ООО «Лазерный Центр»

195067, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Тухачевского, 22

denis@newlaser.ru

Компания ООО «Лазерный Центр» основана в 2004 году в г. Санкт-Петербург как производственная и научно-техническая организация.

Основная задача компания — разработка и производство лазерного технологического оборудования и технологий для нужд отечественных предприятий в целях достижения технологического суверенитета и принципов импортозамещения.

Компания имеет большие компетенции в области производства оборудования, разработке собственных алгоритмов управления лазерными источниками и средствами автоматизации, разработке программного обеспечения для нужд конечного пользователя.

В линейке станков компании представлены станки для лазерной резки (Модель «RX-150»), станки лазерной микрообработки (Модель «МикроСЕТ»), станки для лазерной подгонки резисторов (модель «ОМЕГА»), станки для лазерной сварки и герметизации корпусов микросборок (модель «ФотонКомпакт») и станки для лазерной маркировки (модель «МиниМаркер2»).

Оборудование компании позволяет обрабатывать широкий спектр специализированных материалов электронной техники: проводники, листовый металл и фольгированные материалы, полупроводниковые пластины (кремний, GaAs) и подложки (поликор, нитрид алюминия, лейкосапфир, ВК керамика и пр.), диэлектрические пластины с различными видами металлизации. Часть из этих материалов традиционно считается сложными для лазерной обработки.

Станки компании позволяют выполнять операции по высокоточной лазерной резке и прошивке отверстий в материалах (точность обработки достигает до 5 мкм, диаметр отверстий от 25 мкм), операции скрайбирования, операции по лазерной безмасковой литографии подложек методом прямого удаления лазерным лучом слоя металлизации с материала подложки (разрешение получаемой схемы составляет 6 мкм проводник и 6 мкм зазор), операции по лазерной автоматической подгонке резисторов для получения заданных параметров интегральных схем, операции по лазерной сварке и герметизации готовых приборов и финальной маркировке продукции, включая микро 2D кодирования для учета и контроля.

Станки компании могут применяться на широком спектре предприятий отрасли микроэлектроника, позволяя обрабатывать материалы начиная с подложек почти на всех этапах сборки интегральных схем и заканчивая финальной маркировкой и упаковкой продукции.

Отдельное внимание компания уделяет разработке оборудования под заказ Заказчика с учетом его индивидуальных требования по наличию специализированной оснастки и средств автоматизации.

Компания производит оборудование с высокой степенью локализации, самостоятельно разрабатывая электронные блоки управления, программное обеспечение, оптические элементы для оборудования. В части лазерных источников

компания сотрудничает с крупнейшими российскими производителями лазерных излучателей компанией ООО «НТО ИРЭ-Полюс» и ООО «Авеста-Проект» и др.

Станки компании отвечают требованиям ПП № 719 для определения оборудования российского производства. Станки компании внесены в официальный реестр товаров произведенных в Российской Федерации.

Компания предоставляет Заказчикам качественное оборудование и сервис на территории РФ. Уже более 4000 компаний в РФ являются пользователями оборудования производства ООО «Лазерный Центр».

На Форуме компания имеет собственный стенд с экспозицией, на котором мы предлагаем обсудить задачи по внедрению лазерных технологий и определить планы по сотрудничеству.

Общая информация о компании и ее продуктах на сайте www.newlaser.ru.



УДК 621.38

Оборудование для контактной фотолитографии AVM Pacific Inc

Богословский В. А.

ООО «Евроинтех»

140011, г. Люберцы, ул. Юбилейная, 26, пом. 016

Обзор оборудования для процессов совмещения и экспонирования производства компании AVM Pacific Inc. (Гонконг, КНР). Использование различных типов установок и источников УФ излучения для получения фоторезивной маски (ФРМ) с линейными размерами элементов до 0,25 нм с использованием контактного метода фотолитографии.

Ключевые слова: фотолитография; совмещение и экспонирование; контактная литография; фоторезист; операции с фоторезистом; дальний ультрафиолет; ближний ультрафиолет; совмещение по обратной стороне; ручное совмещение; СВЧ; МЭМС; интегральная оптика; автоматизация.

Ручные, полуавтоматические установки контактной литографии производства AVM Pacific Inc. обеспечивают работу в большом диапазоне спектра УФ и видимого излучения от 220 до 435 нм, что позволяет формировать структуры на различных типах фоторезиста от 0,25 нм, также обеспечивать точность совмещения по лицевой стороне свыше 0,5 мкм и свыше 1 мкм по обратной стороне подложки. Системы производства AVM Pacific Inc. комплектуются источниками питания и оптическими трактами собственной разработки компании, а также включают в себя следующие конструктивные элементы:

- двухканальный источник питания УФ лампы с системой обратной связи который регулирует ток или мощность в зависимости от износа лампы и препятствует ее повреждению при поджиге. Установки могут быть укомплектованы светодиодным источником УФ излучения;
- источник УФ излучения, в состав которого входит зеркало с контролируемым диапазоном отражения (фильтр), скремблер «мушиный глаз» для создания однородности светового потока и коллиматорная линза для обеспечения равномерности засветки всей площади пятна экспонирования (свыше $\pm 3\%$ по всей площади для подложки 8");
- система совмещения обеспечивает точное наложение фотошаблона (ФШ) на экспонируемую подложку как по верхней, так и по обратной стороне, а для кремниевых и других ИК прозрачных материалов возможен процесс совмещения в ИК-диапазоне «на просвет»;
- Настольные системы могут быть ручными или оборудованы различными устройствами автоматизации, вплоть до систем технического зрения.

На рис. 1 представлена установка AVM/6/NUV/LED/DCCD/BSV/SA/AA производства компании AVM Pacific Inc. (Гонконг, КНР). Настольная установка обеспечивает работу как в ручном, так и в полуавтоматическом режиме. Установка оборудована системой распознавания образов и моторизированными осями столика, что обеспечивает возможность автоматизированного поиска и наложения меток совмещения без участия человека. Для специальных производственных задач установка может оснащаться ЗРУ для различных типов кассет.



Рис. 1. Полуавтоматическая установка с модулем автоматического поиска и наложения меток совмещения

Следует отметить, что для систем ручного и автоматического совмещения применяются различные типы меток совмещения. Для ручных и полуавтоматических систем при совмещении метка на шаблоне накладывается на метку совмещения на подложке без зазора. Для автоматизированных систем метки имеют просвет относительно которого система распознавания образов центрирует внутреннюю метку располагая ее в центр внешней с одинаковым просветом по каждой из сторон.

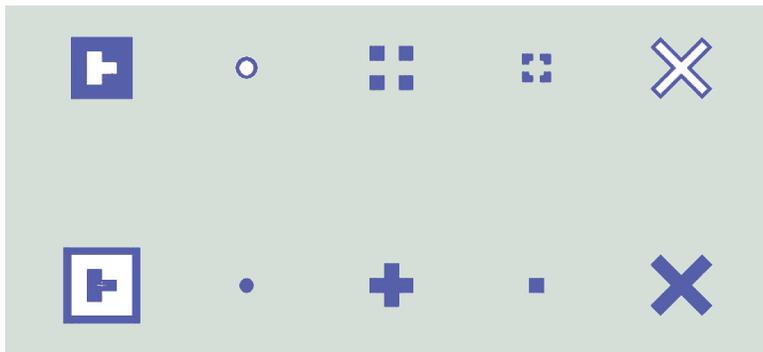


Рис. 2. Примеры меток совмещения

Установки управляются промышленным компьютером с графическим интерфейсом «человек-машина». В составе установки:

- система пневматических цилиндров для управления перемещением микроскопов, источника УФ излучения и держателя ФШ;
- столик, обеспечивающий фиксацию и выравнивание подложки с системой перемещения по четырем осям;



- вакуумная система для фиксации ФШ и подложек;
- ручная или автоматическая система совмещения;
- система УФ излучения в кожухе;
- двухканальный источник питания.

Все элементы установки располагаются на стальной раме, установленной на виброизолирующие демпферы.

Литература

1. АВМ, Inc — текст электронный [сайт] <https://abmasia.com.hk>.
2. Презентация АВМ Photolithography Equipment.
3. Презентация АВМ Photolithography Process Presentation.

УДК 62-175

Установки химического осаждения из газовой фазы**Якухина А. В.***Научно-технический консультант**ООО «ФРЕЗАРТ»**117587, г. Москва, ул. Днепронетровская, 2, офис 514**a.yakukhina@frezart.ru*

Применение процессов CVD для различных приложений в микроэлектронике. Формирование тонких пленок высокого качества для изготовления устройств микроэлектроники с использованием установок LPCVD. Синтез CVD-алмаза с использованием установки MPCVD производства компании Zhengzhou CY Scientific Instrument Co., Ltd (Китай), а также с использованием собственных разработок компании ООО «ФРЕЗАРТ».

Ключевые слова: CVD; тонкие пленки; синтез; алмаз; LPCVD; MPCVD.

Метод химического осаждения из газовой фазы (CVD) широко применяется в микроэлектронной промышленности для создания высокочистых тонких пленок различного применения. Метод химического осаждения практически не имеет ограничений по химическому составу покрытий. Все присутствующие частицы могут быть осаждены на поверхность материала. Комбинация газов и параметров процесса непосредственно влияют на итоговое покрытие.

Установки LPCVD SUNRED

LPCVD — CVD-процесс при давлении ниже атмосферного. Пониженное давление снижает вероятность нежелательных побочных реакций в газовой фазе и ведет к более равномерному осаждению пленки на подложку. Скорость роста пленки ограничивается скоростью поверхностной реакции, которая зависит от температуры. Применяется для нанесения пленок SiO₂ (TEOS), Poly-Si, SiN и др. Широко используется в процессах производства полупроводниковых интегральных схем, силовой электроники, оптоэлектроники и МЭМС.

Компания Sunred (Wuxi) Co., Ltd (Китай) предлагает свой вариант решения задачи формирования высококачественных пленок. В линейке продукции компании можно выделить два типа LPCVD установок: вертикальную и горизонтальную (рис. 1). Вертикальная применяется для работы с пластинами диаметром 8–12 дюймов. Горизонтальная — 4–6 дюймов. Данная установка позволяет не только создавать вышеуказанные пленки, но и реализовывать другие процессы с использованием различных конфигураций газа.

Оборудование состоит из системы нагрева, вакуумной системы, системы газового контура и компьютерной системы управления (СУ). В трубе установки LPCVD используется специальная низкотемпературная печь, в составе которой модуль тиристора SCR. Система нагрева состоит из системы контроля температуры с самонастраивающимся PID для точного контроля температуры (точность 0,1 °C), регулирования мощности, трансформатора и печи.

Функционал СУ (на английском языке) включает в себя возможность настройки этапов, просмотра и вывода всех сведений по процессу в режиме реального времени без потери данных.



Рис. 1. Внешний вид горизонтальной установки LPCVD SUNRED

Установки синтеза CVD-алмаза

Синтез алмаза — частный случай использования технологии CVD. Процесс основан на разложении углеводородов в смеси с H_2 с помощью СВЧ-плазмы и последующем осаждении на нагретую подложку.

Компания Zhengzhou CY Scientific Instrument Co., Ltd (Китай) предлагает свой вариант установки для синтеза алмаза (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид установки синтеза Zhengzhou CY

Основные параметры установки MPCVD:

- входная мощность: 380 В/50 Гц, 10 кВт;
- частота выходного сигнала микроволн: 2450 ± 50 МГц;

- мощность выходного сигнала микроволн: 10 кВт;
- диаметр ступени осаждения образца ≥ 90 мм;
- количество 7×7 CVD-алмазных заготовок (за один процесс): 81 шт.;
- ежемесячный объем производства (7×7×4,3 мм): 162 шт.;
- скорость осаждения: скорость роста 14–15 мкм/час.

Компания ООО «ФРЕЗАРТ» является поставщиком готовых технологических решений по требованиям заказчика, сотрудничает с ведущими производителями и имеет собственную научно-техническую лабораторию, занимающуюся разработками и исследованиями в области создания технологического оборудования и синтеза материалов.

Грамотный выбор технологического оборудования для реализации конкретной задачи является залогом стабильного получения требуемого результата и высокого качества изделий.

Литература

1. Горизонтальная установка LPCVD. — URL: <http://www.sunred.cn/product-item-23.html>.
2. ZHENGZHOU TAINUO FILM MATERIALS CO., LTD. — URL: http://www.zztainuo.com/zztainuo_Intro.html.
3. Выращивание материалов методом CVD. — URL: <https://oltech.ru/technology/vyrashchivanie-materialov-metodom-cvd>.
4. Ральченко В., Конов В. CVD-алмазы. Применение в электронике // Электроника: наука, технология, бизнес, 2007. — № 4. — С. 58–67.



УДК 621.382.002

Столик технологический с приводами наклона и поворота для установки ионной имплантации

Азаров А. А., д. т. н. Тимошенков С. П.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Azar91@mail.ru

Ключевые слова: ионная имплантация; технологический столик; tilt; twist.

Введение

При ионной имплантации кремниевой пластины диаметром 200 мм применяется индивидуальная поштучная обработка. Для этого ведущими мировыми производителями используются технологические столики с электростатическим прижимом, на которых пластина удерживается и обрабатывается [1]. Эти столики обеспечивают вращение пластины вокруг ее оси в диапазоне от 0 до 360° с точностью $\pm 0,1^\circ$ (Twist), а также наклон по оси $\pm 60^\circ$ с точностью $\pm 0,5^\circ$ относительно ионного пучка в разных плоскостях (tilt) [2–3]. Существующие на сегодняшний день конструкции имеют большие габариты, из-за чего ионный пучок попадает на основные элементы системы и распыляет их. В связи с большой массой роботов увеличивается мощность приводов и, как следствие, энергопотребление. Это существенные недостатки данных конструкций.

Целью исследования являлась разработка столика с приводами, обеспечивающими основные технологические требования наклона и поворота для установки ионной имплантации с уменьшенными площадями распыления и компактными габаритами.

Материал и методы

Изучен опыт создания зарубежных установок Axcelis Purion M, Axcelis Purion H200, Varian VIISta 810 и проанализирована площадь контактирования с пучком на максимальных углах Tilt 1 (в плоскости YZ) и Tilt 2 (в плоскости XZ). Были построены 3D-модели деталей и массогабаритные 3D-модели комплектующих. Выполнена сборка 3D-модели в CAD-системе Solidworks и в добавлении Solid motion на спроектированной модели расположены виртуальные приводы. Выполнены расчеты требуемых вращающих моментов для приводов нового разработанного столика в CAD-системе Solidworks.

Результаты

Согласно исследованию, на максимальных углах наклона Tilt 1 (в плоскости YZ) и Tilt 2 (в плоскости XZ) наибольшая площадь конструкции взаимодействует с пучком, что приводит к максимальной генерации частиц и распылению взаимодействующих с пучком деталей. Спроектирована оптимальная конструкция на основе сервоприводов с абсолютными энкодерами и уменьшенной площадью контакта с пучком. Требования по точности позиционирования наклона и поворота соответствовали предъявляемым к аналогичному оборудованию. Планируется внедрение разработанной конструкции в проект имплантера.

Выводы

В результате выполнения работы спроектирован столик, позволяющий осуществить наклон и поворот, в котором уменьшена площадь контакта с пучком и, следовательно, уменьшена генерация частиц в процессной камере.

Литература

1. Renau A. // A chapter in book Ion Implantation: Applications, Science and Technology J. F. Ziegler, ed. (2018).
2. Currenta M. I., Rubinb L., Sinclair F. // Chapter 3 Commercial Ion Implantation Systems; a chapter in book Ion Implantation Science and Technology; 3–41, 2018 Publisher: Ion Implant Technology Co.
3. Scheuer J. T., Renau A., Olson J. C., Smatlak D. L., Cucchetti A., Sud R., Bustin R. // VIISa 810 dosimetry performance; IIT00 (2000) 615–618.



УДК 621.6.05

Обязка специального технологического оборудования в условиях запускаемого производства

Ерохин С. А.

ООО «НМ-Тех»

*124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а
Erokhin@nm-tech.org*

Выработана методика организации работ по подключению к инженерным сетям предприятия большого количества специального технологического и периферийного оборудования в условиях сжатых сроков и запускаемого предприятия. Выработаны подходы к апробированию и аттестации новых материалов. Подобранны аналоги периферийного оборудования.

Ключевые слова: специальное технологическое оборудования; чистые и особо чистые среды; периферийное оборудование; инженерные системы; новые материалы.

Современная мировая практика по строительству заводов для полупроводниковой промышленности — последовательные работы по проектированию, строительству, монтажу и запуску инженерных систем, запуску ЧПП, с последующим заводом и запуском специального технологического оборудования (СТО). Поставленная перед инженерными службами задача, требовала в сжатые сроки обязать существующее и закупаемое специальное технологическое оборудование в параллель с процессами постановки технологии на уже введенном в эксплуатацию оборудовании.

Основные вызовы перед инженерными службами:

- 1) уход с рынка таких мировых лидеров по материалам для чистых и особо чистых сред как Entegris, Dockweiler AG и т. п., производителей периферийного оборудования Ebara, Airgard, CSK и т. п., а также профильных монтажных организаций INTEGA, FÄTH и т. п.;
- 2) жесткий график работ по подключению, с показателем не менее 2–3 единиц в месяц, СТО к инженерным сетям предприятия, синхронизированный не только с производственным планом, но и с этапами отработки узлов приборов.

В рамках задач по поиску и внедрению альтернативных решений по материалам для чистых и особо чистых сред были разработаны новые методики оценки и аттестации материалов согласно стандартам SEMI, а также разработаны и собраны испытательные стенды. Переориентация на аналоги по периферийному оборудованию решила проблему с доступностью к приобретению и самостоятельному обслуживанию.

Работы с вновь организованными, после ухода с российского рынка зарубежных представителей, и существующими российскими профильными монтажными организациями, потребовали, фактически, заново осваивать регламенты по монтажу и аттестации инженерных систем согласно стандартам SEMI.

Реализация жесткого графика по подключению СТО стала возможна благодаря разработке методик по организации работ с делением на этапы и определением зон ответственности между службами снабжения, инженерными

и производственными службами. Четко выстроенное взаимодействие между инженерной службой, инженеринговым центром и зарубежным поставщиком СТО позволило организовать работы по подготовке к подключению СТО за долго до его поставки на производственные площади и уменьшить фактические работы, в зависимости от сложности СТО, до 2–4 недель с момента фактической поставки СТО и с учетом аттестаций инженерных систем.

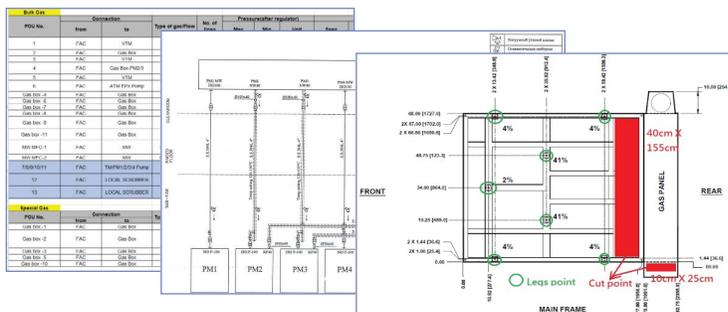


Рис. 1. Последовательность подготовительных работ

По итогам проделанных работ удалось снизить зависимость от санкционных материалов для чистых и особо чистых сред, периферийного оборудования, а также выстроить ритмичную работу по подключению инженерных систем согласно стандартам SEMI.

Литература

1. SEMI F63 — Guide for Ultrapure Water Used in Semiconductor Processing.
2. SEMI F75 — Guide for Quality Monitoring of Ultrapure Water Used in Semiconductor Manufacturing.
3. ГОСТ Р ИСО 14644-5-2005 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды, Эксплуатация.



УДК 006.91

Метрологическое обеспечение системы для испытаний бесконтактных интерфейсов в соответствии с ГОСТ 14443

Шмигельский В. В., Лебедев А. В., к. т. н.

ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4, 4а
info@nm-tech.org

Разработана методика калибровки системы для испытаний бесконтактного интерфейса в соответствии с ГОСТ 14443, необходимая для обеспечения единства измерений гражданской продукции. Представлен алгоритм, используемый при калибровке, основные метрологические характеристики и средства измерений для калибровки системы.

Ключевые слова: бесконтактный интерфейс; калибровка; средства измерений.

В настоящее время применение устройств с радиочастотным интерфейсом очень популярно в различных областях: банковские карты, NFC метки для оплаты, проездные документы, метки для определения в крови сахара и другие популярные устройства. Для проверки радиочастотных интерфейсов необходимо применять специализированные тестовые комплексы зарубежных производителей, которые позволяют проводить тестирование не только самих кристаллов для меток и аналоговых частей приемопередатчиков, но и считывающих устройств.

Основная сложность, с которой сталкиваются при использовании такого специализированного оборудования — необходимость разработки методики калибровки, разработка руководства по качеству организации и выполнении калибровочных работ. При разработке методики калибровки таких специализированных тестовых систем необходимо учитывать, что используемые средства измерений должны быть поверены или быть откалиброванными. При этом, еще одним важным параметром работы таких систем является встроенное программное обеспечение, которое позволяет учитывать все возможные варианты запросов и ответов, а также длительность спада и нарастания фронтов. Применение таких специализированных тестовых стендов на этапе разработки позволяет разработчикам в процессе разработки проводить измерения цифровой части микросхемы с помощью макетных плат, а так же провести разработку и отладку основной части микросхемы на дискретных элементах с последующим переносом в САПР и разработкой приемопередающего тракта. К сожалению, на текущий момент времени не существует подобных удобных аналогов таких систем отечественного производства.

Методика калибровки данных систем сводится к проверке метрологически значимых характеристик на каждом из измерительных портов системы. Система имеет несколько измерительных портов типа «I» (Input), «I/O» (Input/Output) и «O» (Output), характеристики которых нормируются в эксплуатационной документации на оборудование. Основными характеристиками при проверке радиотехнических систем и средств измерений являются частота выходного сигнала, выходная мощность сигнала, линейность сигнала; уровень гармонических составляющих; напряжение смещения, а также уровень шума. Эти характеристики необходимы для анализа протоколов ISO 14443 (A/B/B'), Mifare, VHBR (ASK, PSK до 27 Мб/с), ISO 15693, 18000-3, NFC-IP1, -IP2 (ISO/IEC 18092, ECMA 340).

Для комплексной оценки параметров портов системы типа «О» необходимо подключить при помощи коаксиального кабеля осциллограф с функцией быстрого преобразования Фурье к измерительному порту системы и провести измерения выходной мощности, уровня шума, уровня гармонических составляющих и напряжение смещения. Используемый при измерениях цифровой осциллограф обладает функциями, позволяющими автоматизировано измерить указанные параметры с требуемой точностью. Проверка частоты выходного сигнала проводится на конкретном порте типа «О», к которому подключен частотомер. Частота проверяется на 12 контрольных точках в диапазоне от 10 до 60 МГц, среди них пять контрольных точек находятся в пределах от 13,55 до 13,57 МГц включительно.

Порты типа «I/O» в системе подключаются к внешней антенне и используются для генерации электромагнитного поля этой антенны и обработки ответной части бесконтактного интерфейса, при этом, метрологически значимых характеристик, относящихся к обработке ответной части, производителем не предъявляется, поэтому методика измерений и измеряемые параметры соответствуют порту «О», за исключением измерения частоты выходного сигнала. Измерение частоты выходного сигнала для портов типа «I/O» является избыточным, поскольку конструктивно, система имеет один источник зондирующего сигнала, распределенный на порты типа «О» и «I/O».

Для оценки параметров портов типа «I» необходимо подключить к измерительному порту генератор сигналов (в методике используется генератор сигналов произвольной формы). Генератор необходимо настроить на воспроизведение синусоидального сигнала частотой 13,56 МГц с амплитудой 0,5 В, в процессе калибровки необходимо проверить измеряемую частоту входного сигнала, мощность входного сигнала, а также уровни собственных шумов в диапазоне от 0 до 30 МГц. Благодаря программному обеспечению системы, большинство тестов проводится в автоматизированном режиме, позволяя сократить время проведения калибровки. Данный алгоритм активно применяется в нашей компании для калибровки такого рода систем.



УДК 628.1

Проект национального стандарта ГОСТ Р «Системы подготовки воды для производства электронной техники. Требования к получению, хранению и распределению ультрачистой воды»

к. х. н. Смирнов В. Б., Сафонова Д. В., Якименко С. И.

АО «НПК МЕДИАНА-ФИЛЬТР»

105318, г. Москва, ул. Ткацкая, 1

smirnov@mediana-filter.ru

Представлен раздел «Классификация воды по качеству для производства электронной техники» проекта стандарта ГОСТ Р «Системы подготовки воды для производства электронной техники». В разделе впервые введена гармонизированная с международными стандартами классификация воды по качеству, приведены параметры для нового типа воды, с качеством, превышающим требования в действующих международных стандартах.

Ключевые слова: ультрачистая вода; вода для микроэлектроники; сверхчистая вода.

Производство микроэлектронной техники в России включает производство схем интегральных электронных диодов, транзисторов и других полупроводниковых приборов, а также продукцию оптоэлектроники. Все эти производства требуют для своего функционирования наличие систем водоподготовки, изготовленных из специальных материалов, позволяющих получать деминерализованную воду с качеством на пределе возможностей определения примесей — ультрачистую воду. Удельные объемы потребления ультрачистой воды на единицу продукции довольно высокие: для производства одной 8-дюймовой (200 мм) кремниевой пластины, лежащей в основе около 100 чипов, может потребоваться до 7500 литров воды, причем около двух третей воды должно быть ультрачистой водой.

На фоне восстановления производства микроэлектронной промышленности в России, на данный момент, отсутствуют современные стандарты на русском языке. Последний опубликованный норматив ОСТ 11.029.003-80 с изм. 1 устарел и не совместим даже со 180 нм технологией.

В связи с этим встает вопрос о национальном стандарте, в котором была бы приведена классификация ультрачистой воды, пригодной для современного массового производства чипов, а также приведен обзор схем ее получения, хранения и распределения. Такой стандарт станет отправной точкой для проектных организаций и для экспертизы таких объектов строительства и реконструкции. Стандарт также может стать отправной точкой для серии стандартов по воде для микроэлектроники в России, которые бы регламентировали методы аналитического контроля, выбора материалов, организации производства ультрачистой воды для промышленного и опытного производства микро- и оптоэлектроники.

Ниже представлена новая классификация воды, применяемой для производства электронной техники.

Параметры, подлежащие контролю, приведены в табл. 1. Проектом стандарта введены восемь типов воды в зависимости от состава, применения и качества.

Типы E1-E3 гармонизированы со стандартом ASTM D5127-13 (в редакции 2018), тип E-1.4 — со стандартом SEMI F63-0521, тип E-1.5 — с IRDS (International roadmap for devices and systems™ 2023 update yield enhancement) в интерпретации авторов стандарта. В связи с тем, что уровни загрязнений в воде типов E1.3-E1.5 находятся за пределами точности аналитических методов, следует рассмотреть возможность принять подход «встроенного» качества (проактивный подход). Когда нет возможности установить влияние измеренных концентраций примесей, находящихся за границей чувствительности аналитической методики, на качество изделия устанавливают корреляционную связь между процентом выхода качественных изделий и мероприятиями, технологиями, корректирующими состав ультрачистой воды.

Таблица 1

Параметры	Тип E-1	Тип E-1.1	Тип E-1.2	Тип E-1.3	Тип E-1.4	Тип E-1.5	Тип E-2	Тип E-3
Название воды	СЧВ с доп. требований по ТОС		УЧВ с доп. требований по частицам				СЧВ	ДВ
Минимальный линейный размер элемента транзистора, нм	1000–500	350–250	180–90	65–32	<45	<10	5000–1000	>5000
Сопротивление, 25 °С, on-line, МОм·см	18,1	18,2	18,2	18,2	не менее 18,18 ±0,2	не менее 18,18 ±0,2	18,1	12
Общий органический углерод (ООУ) ТОС, мкг/л	5	2	1	1	<1	<0.3 ⁶	50	300
On-line растворенный O ₂ , мкг/л	25	10	3	10 ¹	<10 ¹	<10 ¹	–	–
On-line частиц/литр (микроны)								
<0,05 (50 нм), on-line	–	–	–	500	X ⁴	<5	–	–
0,05–0,1	–	1000	200	НД	–	НД	–	–
0,1–0,2	1000	350	<100	НД	–	НД	–	–
0,2–0,5	500	<100	<10	НД	–	НД	–	–
0,5–1,0	200	<50	<5	НД	–	НД	–	–
1,0	<100	<20	<1	НД	–	НД	–	–
СЭМ частиц, шт./литр								
0,1–0,2 мкм	1000	700	<250	НД	–	НД		–
0,2–0,5 мкм	500	400	<100	НД	–	НД	3000	–
0,5–1,0 мкм	100	50	<30	НД	–	НД	–	10000



Параметры	Тип Е-1	Тип Е-1.1	Тип Е-1.2	Тип Е-1.3	Тип Е-1.4	Тип Е-1.5	Тип Е-2	Тип Е-3
10 мкм	<50	<30	<10	НД	–	НД	–	–
Метод SEM ² , определение частиц 50 нм и более в пробе, шт. в 1 л	–	–	–	–	<300	<100	–	–
Прекурсоры частиц ⁵	–	–	–	–	В разработке		–	–
Ожидаемая концентрация частиц в пробе методом LNS ⁷ шт./л (нанометр)								
3,0	–	–	–	–	–	<10000	–	–
9,0	–	–	–	–	–	<1000	–	–
20	–	–	–	–	–	<50	–	–
Бактерии в КОЕ/объем								
образец 100 мл	5	3	1	НД	<1	<1	10	50
образец 1 литр	–	–	10	1	–	–	–	–
образец 10 литров	–	–	–	1	1	1	–	–
Общий кремний (мкг/л)	5	3	1	0,5	<0,05	<0,01	10	50
Растворенный кремний, мкг/л	3	1	0,5	0,5	–	–	–	–
Нелетучий остаток (Nonvolatile Residue (NVR), нг	1000	500	100	–	<100 ³	НД	НД	НД
Анионы и аммоний по IC (нг/л)								
Аммоний	100	100	500	50	<50	<20	–	–
Бромид	100	50	20	50	<50	<10	–	–
Хлорид	100	50	20	50	<50	<10	–	–
Фтор	100	50	30	50	<50	<10	–	–
Нитрат	100	50	20	50	<50	<10	–	–
Нитрит	100	50	20	50	<50	<10	–	–
Фосфат	100	50	20	50	<20	<10	–	–
Сульфат	100	50	20	50	<50	<10	–	–
Металлы и Бор ICP/MS (нг/л)								
Алюминий	50	20	5	1	<1	<0,5	–	–
Барий	50	20	1	1	<1	<0,5	–	–
Сурьма	–	–	–	1	<1	<0,5	–	–

Параметры	Тип Е-1	Тип Е-1.1	Тип Е-1.2	Тип Е-1.3	Тип Е-1.4	Тип Е-1.5	Тип Е-2	Тип Е-3
Мышьяк	–	–	–	1	<1	<0,5	–	–
Бор	300	100	50	50	<50	<15	–	–
Кадмий	–	–	–	10	<1	<0,5	–	–
Кальций	50	20	2	1	<1	<0,5	–	–
Хром	50	20	2	1	<1	<0,5	–	–
Медь	50	20	2	1	<1	<0,5	–	–
Железо	50	20	2	1	<1	<0,5	–	–
Свинец	50	20	5	1	<1	<0,5	–	–
Литий	50	20	3	1	<1	<0,5	–	–
Магний	50	20	2	1	<1	<0,5	–	–
Марганец	50	20	2	1	<1	<0,5	–	–
Никель	50	20	2	1	<3	<1,6	–	–
Калий	50	20	5	1	<1	<0,5	–	–
Натрий	50	20	5	1	<1	<0,5	–	–
Стронций	50	20	1	–	<1	<0,5	–	–
Олово	–	–	–	1	<1	<0,5	–	–
Титан	–	–	–	1	<1	<0,5	–	–
Ванадий	–	–	–	1	<1	<0,5	–	–
Цинк	50	20	2	1	<1	<0,5	–	–
Кобальт	–	–	–	–	<1	<0,5	–	–
Молибден	–	–	–	–	<1	<0,5	–	–
Платина	–	–	–	–	<1	<0,5	–	–
Вольфрам	–	–	–	–	<1	<0,5	–	–
Концентрация металлов в системе хранения (Co, Cu, Pt, Ag, Mo, W, Ti, Mn) в технологии производства оптических датчиков, нг	–	–	–	–	<1	–	–	–



Параметры	Тип E-1	Тип E-1.1	Тип E-1.2	Тип E-1.3	Тип E-1.4	Тип E-1.5	Тип E-2	Тип E-3
Концентрация металлов в точках потребления (Co, Cu, Pt, Ag, Mo, W, Ti, Mn) в технологии производства оптических датчиков, нг	–	–	–	–	<0,2	–	–	–
Стабильность температуры, для иммерсионной литографии, К	НД	НД	НД	±1	±1	НД	НД	НД
Температурный градиент (К/10 мин) для иммерсионной литографии	НД	НД	НД	<0,1	<0,1	НД	НД	НД
Растворенный азот in-Line, мг/л. Только для УЗ-очистки	НД	НД	НД	8–18	8–18	НД	НД	НД
Стабильность поддержания концентрации азота мг/л. Только для УЗ-очистки	НД	НД	НД	±2	±2	НД	НД	НД
Пероксид водорода, мкг/л	НД	НД	НД	НД	3	1	НД	НД

Прочерк (–) в таблице означает, что стандарт не требует проведения контроля данного параметра.

НД означает, что хотя контроль по этому параметру может вестись для оценки работоспособности оборудования, однако стандарт не устанавливает требований к указанному параметру. Например, это может быть в случае, когда контролируются более информативные параметры или этот параметр перекрывает другие, например, контролируются более мелкие частицы, и тогда контроль более крупных становится бесполезным, т. к. технология удаления частиц исключает проскок более крупных.

1 — критическая концентрация кислорода определяется технологическим процессом, для чувствительных к кислороду процессов устанавливают лимит 1 мкг/л.

2 — SEM — это метод подсчета частиц на поверхности субмикронного фильтра (рейтинг 50 нм), через который было пропущено от 1000 л УЧВ и затем с помощью электронного микроскопа подсчитаны осевшие на поверхности фильтра частицы. (<https://dynateklabs.com/sem-analysis-of-particles>).

3 — используется как индикатор проскока кремния, для оценки стабильности работы системы водоподготовки. Изменение значения на 20 нг от средних значений считается сигналом для проведения более тщательной проверки проскока кремния.

4 — нормативное значение концентрации частиц. Предприятие принимает его самостоятельно, руководствуясь процентом отбракованной продукции от 1 до 20 %. Размер частиц-убийц зависит от размеров производственного узла. В определении IRDS для размера частиц-убийц используется утверждение, что ее размер составляет половину расстояния между самыми близкими элементами транзистора в нм. В таблице не указано конкретное значение количества частиц для размера <50 нм. Рекомендуется использовать самые передовые методы измерения для решения задач по контролю частиц. Целевое значение частиц-убийц на входе в фильтры точек потребления определяется на основе следующих предположений:

- целевая концентрация частиц-убийц в УЧВ составляет 10 шт./мл согласно UPWIRDS.
- используются лучшие в своем классе фильтры, обеспечивающие эффективность удаления частиц-убийц не менее 99%, что должно быть подтверждено тестом. Для частиц размером менее 10 нм следует предположить более низкую эффективность. Может потребоваться учет эффективности фильтрации в точках потребления.
- для мониторинга частиц с помощью существующих онлайн-счетчиков частиц используется аппроксимация по закону распределения. Рекомендуется использовать коэффициент распределения равный 3.

5 — Прекурсоры частиц определяются как растворенные молекулярные соединения, которые при высыхании воды могут образовывать частицы на пластине. Прекурсоры частиц — это локальные концентрации высокомолекулярных соединений, которые могут изменить свою морфологию под воздействием химических или физических условий и сформировать фазу, способную осаждаться на поверхности пластины в виде частиц. Обнаружить прекурсоры частиц задача не тривиальная. Метод распыления воды, содержащей прекурсоры частиц до испарения, и исследование образовавшегося аэрозоля (Liquid NanoParticle Sizer (LNS)) показал перспективность обнаружения прекурсоров частиц таким способом.

6 — ТОС для иммерсионной литографии <1,0 мкг/л, до 3 мкг/л для некритических органических веществ. Критические органические вещества — нелетучие полярные органические соединения с температурой кипения >200 °С. Критические органические соединения должны контролироваться до уровня <1 мкг/л.

Литература

1. ASTM D5127-13 Re 2018 «Standard Guide for Ultra-Pure Water Used in the Electronics and Semiconductor Industries».
2. SEMI F61-0617 «Guide to design and operation of a semiconductor Ultrapure water system».
3. SEMI F63-0918 «Guide for ultrapure water used in semiconductor processing».
4. Proactive Particle Control in Ultrapure Water (UPW) in Silicon Wafer Cleaning Process, IRDS, 2023 Update.
5. International roadmap for devices and systems™ 2023 update Yield Enhancement.



УДК 004-932

Система автоматической оптической инспекции печатных плат

Каширин Н. В., Ходотаева Т. С., Аверина А. И., Гурьянов А. Е., Русинов Г. А.

Марийский государственный университет

424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1

kachnic@mail.ru

Разработан макет системы автоматической оптической инспекции печатных плат в условиях их массового производства. Система в автоматическом режиме сканирует печатную плату, распознает дефекты рисунка с использованием глубокого машинного обучения на основе сверточной нейронной сети архитектуры YOLOv4.

Ключевые слова: печатная плата; дефекты печатного рисунка; автоматическая оптическая инспекция; машинное обучение.

Разработанная нами система автоматической оптической инспекции (АОИ) позволяет проводить обнаружение наиболее критичных дефектов печатных плат (ПП): короткое замыкания (short), обрывы (open), выступы (spur), медные включения (островки, соррег), микроотверстия (проколы, pin-hole) и отклонение толщины проводников (mousebite).

Основные компоненты системы АОИ:

1. Система движения и электронная система управления движением (ось сканирования X оптической головки, ось Y стола, ось Z оптической системы).
2. Модуль освещения и программа для управления освещением.
3. Модуль получения изображения с видеооптической головкой FULL, HD-камерой с CMOS датчиком и объективом.
4. Компьютер и ПО для обработки изображений и выявления дефектов.
5. Стол, поддерживающий различные размеры панелей (max размер 660×610);

При разработке аппаратного обеспечения было уделено особое внимание модулю освещения. Наилучшее качество изображения было получено при использовании рассеянного освещения красными и синими диодами мощностью 16 мВт (27 мА) с длиной волны 400 ± 10 нм. Интенсивность освещения подбирается отдельно для каждой партии плат.

ПО для обнаружения дефектов ПП включает в себя модуль обработки изображений, который получает данные с оптического датчика, сохраняет их в базе данных SQLite и анализирует их; модуль фильтрации, который устраняет шумы и искажения на изображении; модуль сегментации, который разделяет изображение на объекты и фон; модуль классификации на основе сверточной нейронной сети архитектуры YOLO [1], определяющий, является ли объект дефектом или нет; и модуль отображения, который выводит результаты на пользовательский интерфейс. Для минимизации ложных срабатываний использовали информацию gerber-файла, в котором находятся все характеристики рисунка печатной платы согласно требованиям ГОСТ Р 53429-2009 [2], в котором даны допуски по искажению рисунка печатной платы. Предобученные модели сверточных нейронных сетей и использование Quadro P6000 фирмы NVIDIA позволили сократить время обучения.

Для увеличения скорости вычисления окна подобия между двумя пикселями исследовались методы известные как таблицы суммированных площадей [3]

и быстрое преобразование Фурье [4]. Метод бинаризации OTSU позволил быстро и автоматически получить правильное пороговое значение, в соответствии с гистограммой распределения значений интенсивностей исходного изображения

Выбор нейронной сети основывался на критериях точности и эффективности, что привело к использованию архитектуры YOLOv4 [5]. Для решения проблемы затухающего градиента к сверточным слоям была добавлена стратегия CSP (Cross Stage Partial). Использование слоя SPP (Spatial Pyramid Pooling) позволило увеличить рецептивное поле и выделить наиболее значимые контекстные функции. Измененная сеть PAnet (Path Aggregation Network) способствовала улучшению процесса сегментации экземпляров за счет сохранения пространственной информации. Также применялись подходы CutMix и Mosaic, регуляризация DropBlock, сглаживание меток класса, использование функции активации Mish. В совокупности все это позволило получить высокую точность при обнаружении маленьких объектов.

Литература

1. Zhenshen Qu, Jianxiong Shen, Ruikun Li, Junyu Liu, Qiuyu Guan, PartsNet: A Unified Deep Network for Automotive Engine Precision Parts Defect Detection // Preprint State Key Laboratory of advanced welding and joining. Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 2018.
2. ГОСТ Р 53429-2009. Печатные платы. Основные параметры конструкции. — М.: Стандартинформ, 2018.
3. Viola P., Jones M. J. Robust Real-Time Object Detection // 2nd Int. Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision — Modeling, Learning, Computing, and Sampling, Vancouver, Canada. Jul. 13, 2001.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Мир цифровой обработки. Цифровая обработка изображений. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2012. — 1104 с.
5. Bochkovskiy A., Wang C.-Y., Mark Liao H.-Y. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection // arXiv, 2020.



УДК: 672.81.05

Оборудование АО «НПП «ЭСТО» для оптики, фотоники и микроэлектронной промышленности

Корячко В. В., Трактирщев В. С., Стройкин А. Е., Черкунов В. И.

АО «НПП «ЭСТО»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 1

v.v.korychko@nppesto.ru

Разработана линейка оборудования плазмохимического травления и магнетронного напыления для проведения базовых технологических процессов для целей оптики, фотоники и микроэлектронной промышленности. Приведены характеристики предлагаемого оборудования и описание уникальных особенностей оборудования.

Ключевые слова: микроэлектроника; оптика; фотоника; плазмохимия; магнетронное напыление; электростатический прижим; Groovy ICP.

АО «НПП «ЭСТО» реализует работу по проектированию и производству оборудования для микроэлектроники в следующих основных направлениях:

- комплексы плазмохимического травления;
- комплексы магнетронного напыления;
- литографическое оборудование (электронно-лучевая литография);
- термическое оборудование (диффузионные печи) — в разработке.

Каждая линейка оборудования, выпускаемая нашей компанией, является неотъемлемой частью для производства различных устройств и компонентов, и для развития микроэлектронной промышленности.

В настоящей статье рассматривается часть оборудования, а именно:

- комплексы плазмохимического травления;
- комплексы магнетронного напыления;

Комплексы плазмохимического травления нашего производства имеют базовый характер и необходимы при реализации компонентов и устройств на подложках, реализуя следующие технологические процессы:

- травление оксида кремния;
- травление кремния;
- снятие фоторезиста;
- травление кремнийсодержащих слоев (оксиды, нитриды, поликремний, КНС, монокристаллический кремний), low-k, удаление фоторезиста *in situ*, а также скоростное травление кремния TSV, твердые маски, аморфный углерод и др.;
- травление арсенида галлия, нитрида галлия, и других сложных полупроводников;
- травление алюминия, меди, золота, серебра, платины и других материалов

Комплексы магнетронного напыления нашего производства имеют базовый характер и необходимы при реализации компонентов и устройств. Установки магнетронного напыления позволяют обрабатывать изделия из различных металлов и сплавов, в том числе алюминиевые, молибденовые, хромовые поверхности. В каталоге НПП «ЭСТО» имеется оборудование для вакуумного напыления различных типов.

УДК 621.3.049.779

Лабораторный оптический литограф на основе технологии цифровой обработки света

Галиуллин А. А.^{1,2}, Марганов С. Г.¹, Кунцевич А. Ю.¹¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

1233550v@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11

Разработаны и реализованы схемы контактной масочной и проекционной безмасочной литографии на основе технологии DLP (цифровая обработка света) проекции при использовании DMD (цифровое микрозеркальное устройство) матрицы для применения в лабораториях. Оба изделия имеют разрешение и точность совмещения порядка 1 мкм.

Ключевые слова: фотолитография; литография; графен; Ван-дер-Ваальсовы гетероструктуры; двумерные материалы; новая электроника.

Технологии проекционной литографии с использованием матриц DMD (цифровых микрозеркальных устройств) изменили различные области: от 3D-печати и сенсоров до микрофлюидики и медицины [1–6]. Распространенность и дешевизна систем цифровой обработки света (digital light processing, DLP) позволяет использовать их как источник модулированного света в системе безмасочного проекционного литографа.

Разработка устройств безмасочной литографии включает в себя проектирование оптической схемы, системы позиционирования подложки (например кремниевой), системы визуального наблюдения за ней, системы фокусировки в красном цвете (длина волны, не экспонирующая фоторезист), а также электронные и программные решения для автоматического контроля перемещения, экспозиции и компенсации различных недостатков схемы (непараллельность осей, люфт позиционеров, неоднородность засветки и прочее) [7].

Множество готовых DLP-систем включает в себя как источник излучения (светодиод), который возможно заменить на светодиод УФ (ультрафиолетового) спектра, так и систему гомогенизации мощности пучка по его площади, за счет чего такие системы можно использовать как готовый источник однородной (однородность мощности >95% по площади) засветки большой (>5×5 см²) площади. Такие готовые DLP-системы можно комбинировать с системой позиционирования подложки и маски, как это например описано в статье [8], обеспечивая высокое качество литографии на большой площади.

Разрешение для обеих установок составляет около 1 мкм с точностью совмещения топологического рисунка около 1 мкм в области совмещения. В работе использовались отечественные фоторезисты и проявители фирмы ФРАСТ.

Литература

1. Dudley D. et al. Emerging digital micromirror device (DMD) applications // MOEMS Display and Imaging Systems; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2003. P. 4985.



2. Lee M. et al. Development of a 3D printer using scanning projection stereolithography // *Sci. Rep.*, 2015. 5, 9875.
3. Lin C. et al. Three-Dimensional Printing of Large Objects with High Resolution by Dynamic Projection Scanning Lithography // *Micromachines*, 2023. 14, 1700.
4. Miri A. K. et al. Microfluidics-enabled multimaterial maskless stereolithographic bio-printing // *Adv. Mater.*, 2018. 30, 1800242.
5. Grogan S. P. et al. Digital micromirror device projection printing system for meniscus tissue engineering // *Acta Biomater.*, 2013. 9, 7218–7226.
6. Kasi D. G. et al. Rapid Prototyping of Organ-on-a-Chip Devices Using Maskless Photolithography // *Micromachines*, 2022. 13, 49.
7. Galiullin A. A., Pugachev M. V., Duleba A. I., Kuntsevich A. Y. Cost-Effective Laboratory Matrix Projection Micro-Lithography System // *Micromachines*, 2024. 15, 39.
8. Pugachev M. V., Duleba A. I., Galiullin A. A., Kuntsevich A. Y. Micromask Lithography for Cheap and Fast 2D Materials Microstructures Fabrication // *Micromachines*, 2021. 12, 850.

УДК 519.722:519.246.2

Использование критерия нормальности Бореля и теоремы Байеса для исследования и описания случайности

Лысенко Е. В.

ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, пом. XII, офис 4,4а
info@nm-tech.org

Рассмотрены и проанализированы национальные и зарубежные стандарты и методы оценки случайности. Предложена методика оценки случайности с использованием теоремы Байеса и критерия нормальности Бореля в дополнение к оценке минимальной энтропии Шеннона, позволяющая учитывать особенности ДСЧ с физическим источником шума для использования в тематических исследованиях.

Ключевые слова: датчик случайных чисел; теорема Байеса; информационная энтропия Шеннона; нормальность Бореля; число Белла; математическая модель; системы аутентификации.

Введение

Современная практика создания миниатюрных электронных устройств идентификации и аутентификации, таких как смарт-карты, сим-карты, системы на кристалле или личные идентификаторы пользователей требует создания датчиков случайных чисел (далее ДСЧ), обладающих малыми линейными размерами, низким энергопотреблением и высокой скоростью работы [1].

На сегодняшний день все датчики случайных чисел, как физические, так и программные должны соответствовать требованиям Международного стандарта AIS31 (AIS 20), NIST 800-90B [2], FIPS140-2 [3] и Российскому стандарту «Принципы разработки и модернизации шифровальных (криптографических) средств защиты информации» [4].

Оценка статистических свойств ДСЧ

Для применения ДСЧ в средствах криптографической защиты информации, они должны обладать определенными статистическими свойствами. Программные датчики случайных чисел просты в реализации и хорошо проходят необходимые статистические тесты различных отечественных и зарубежных стандартов, однако, т. к. они работают по детерминированному алгоритму, им необходима инициализирующая последовательность, которую получают с физического ДСЧ (ФДСЧ). Данные последовательности записывают в память устройства, однако, примерно через год, записанную последовательность необходимо обновлять в сертифицированных центрах [5], что вызывает большие неудобства и исключает применение таких устройств на массовом рынке. Таким образом, возникает необходимость использовать встроенный ФДСЧ, что накладывает требования соответствия малым линейным размерам и низкому энергопотреблению, что исключает возможность использования шумовых диодов [6, 7, 8], для которых имеется доказанный математический аппарат для обоснования статистических свойств. Логично возникает необходимость разработки методик оценки свойств физических ДСЧ не использующих шумовой диод в качестве источника шума.



Однако, оценка свойств ДСЧ с источником шума основанным на недетерминированным физическим процессе (таким как полураспад радиоактивного материала, счетчик фотонов, лавинный эффект диодов) имеет свои особенности, отличающие их от программных ДСЧ. Основным отличием является наличие смещения в распределении нулей и единиц в битовой последовательности. Поэтому в ФДСЧ часто применяют корректор Фон-Неймана для выравнивания смещения. Так же следует иметь ввиду что статистические тесты, описанные в таких стандартах как NIST и AIS31, разработаны для тестирования ПДСЧ и не могут выявить существенной разницы между работой ПДСЧ и ФДСЧ. Ранее была предложена методика оценки статистических свойств на основе расчета минимальной информационной энтропии Шеннона, используя Марковские цепи. Однако, данная оценка не всегда дает точный результат и не подходит для всех источников шума (например минимальная энтропия равная 0.6). Поэтому в данной работе, для более полного описания случайности и оценки статистических свойств ФДСЧ (впрочем данный подход применим и к ПДСЧ, но особенно интересен именно для ФДСЧ) предлагается использовать критерий нормальности Бореля [9] позволяющий оценить возможность сжатия последовательности, а так же теорему Байеса для подбора статистической модели [10] наиболее точно описывающей распределение значений в выходной битовой последовательности снятой с ДСЧ.

Заключение

В ходе данной работы, автором предложен метод оценки датчиков случайных чисел, обладающих малыми размерами и являющимися энергоэффективными, основанный на критерии нормальности Бореля и теореме Байеса, способный учитывать особенности физических датчиков случайных чисел.

Литература

1. Зиновьев Д. В., Лебедев А. В., Никитин А. П., о некоторых аспектах проектирования и практической реализации генераторов случайных чисел низкого энергопотребления // Тезисы 10-го межведомственного научно-практического семинара «Системы и средства защиты информации», 2018.
2. Meltem Sönmez Turan, Elaine Barker, John Kelsey, Kerry A. McKay, Mary L. Baish, Mike Boyle. Recommendation for the Entropy Sources Used for Random Bit Generation // NIST Special Publication 800-90B, 2018. 84 p.
3. FIPS PUB 140-2: Security Requirements for Cryptographic Modules.
4. Р 1323565.1.012-2017 КРИПТОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ. Принципы разработки и модернизации шифровальных (криптографических) средств защиты информации. ОКС 35.040.
5. «Требования к средствам криптографической защиты информации, предназначенным для обеспечения некорректируемой регистрации информации, не содержащей сведений, составляющих государственную тайну» (СКЗИ-НР), 2019.
6. Виноградов А. С., Сычев А. Н. Диодный генератор шума для радиометрической системы. — М., 4 с.
7. Физический генератор случайных чисел «ГСЧ Гроссмейстер» на диоде-генераторе шума ND 102L, Москва, 2018.

8. Технический комитет по стандартизации «Криптографическая защита информации» — Физические генераторы случайных чисел для применения в СКЗИ, не содержащих сведения, составляющие государственную тайну. Москва, 2018.
9. Calude C. Borel normality and algorithmic randomness // Rozenberg G., Salomaa Arto (eds.), *Developments in Language Theory: At the Crossroads of Mathematics, Computer Science and Biology*, World Scientific, Singapore, 1994.
10. Denison D. G. T., Holmes C. C., Mallick B. K., Smith A. F. M. *Bayesian Methods for Nonlinear Classification and Regression*. John Wiley, 2002. ISBN 0-471-49036-9.

УДК 537.533.3

Сравнение производительности электронных литографов с гауссовским и профилированным пучком

Казьмирук В. В., к. ф.-м. н., Курганов И. Г.

Институт проблем технологии микроэлектроники

и обособленных материалов РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

Приведено сравнение производительности и других характеристик электронных литографов (ЭЛ) с гауссовским и профилированным пучком. Получены соотношения, позволяющие оптимизировать параметры экспонирования структур в зависимости от размера элементов, чувствительности резиста и других характеристик ЭЛ. Показаны варианты построения бортовой сети КА с применением данного комплекта СБИС.

Ключевые слова: электронная литография; электронно-оптические системы; электронные резисты.

Современные электронные литографы подразделяются на два основных класса с гауссовским пучком (Gaussian Beam — GB) и с профилированным пучком (Shaped Beam — SB). Последние, в свою очередь, можно подразделить на системы с квадратным пучком (VSB) системы с прямоугольным пучком (MSB) и системы, позволяющие создавать примитивы сложной формы (CP).

Для корректного сравнения GB и SB систем оценим время экспонирования 1 см² резиста. В этом случае на поверхность должен быть перенесен заряд, численно равный чувствительности резиста D (Кл/см²).

В литографах с гауссовским пучком рисунок выполняют при сканировании пучка по узлам сетки с достаточно мелким шагом Δ, значение которого выбирают исходя из требований к минимальному размеру элементов. Типичное значение Δ = 15–30 нм. При выбранном шаге условие корректного экспонирования определяется выражением (1):

$$\Delta = (10^5 I / Df)^{1/2}, \tag{1}$$

где f — частота генератора развертки (МГц); I — ток пучка (нА); D — чувствительность резиста (мкКл/см²).

Время экспонирования с шагом сетки 30 нм для различных сочетаний параметров представлено в табл. 1.

Таблица 1

Δ, нм	F, МГц	D, = 100 мкКл/см ² I, нА	D, = 10 мкКл/см I, нА ²	t, сек
30	2	1,8	0,18	55555
30	20	18	1,8	5555
30	100	90	9	1111
30	400	360	36	277
30	800	720	72	139

Таблица 2

Тип	t, сек CAR	t, сек PMMA
VSB (50)	1 328	13284
MSB1 (20)	637	6372
MSB2 (20)	396	3960
MSB3 (20)	601	6012

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что при токе пучка 100 нА приемлемое значение шага сетки достигается лишь при частотах развертки 100 МГц и выше

При экспонировании профилированным пучком плотность тока J остается постоянной и составляет для VSB и MSB 50 и 20 А/см². Следовательно, длительность одной экспозиции (шота), определяемая как $\tau = D/J$ равна соответственно 200 и 500 нсек при использовании резиста с химическим усилением (CAR) с чувствительностью $D = 10^{-5}$ Кл/см² и 2 и 5 мксек для резиста PMMA. Время экспонирования $t = \tau n$, где n — число шотов в 1 см².

Данные для профилированных пучков (табл. 2) взяты из статьи фирмы Vistec [1].

Таким образом, стратегия повышения скорости экспонирования состоит в уменьшении числа шотов за счет оптимального расположения и при максимально возможных размерах.

Литература

1. Gramss U., Stoeckel A. et al. // Proc of SPIE, 2010. Vol. 7823. 782309.



УДК 004.896

Электронные модули и аппаратные средства распределенной системы управления роботами сейсморазведки

д. т. н., профессор Ронжин А. Л., к. т. н. Савельев А. И., Крестовников К. Д.,
Ерашов А. А.

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН
199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39
ronzhin@iias.spb.su*

В рамках предложенной архитектуры распределенной системы управления гетерогенными робототехническими комплексами обсуждаются требования и ограничения, предъявляемые к вычислительным и сенсорным электронным встроенным модулям. Описан подход к организации распределенной системы управления, допускающий ее реконфигурацию в зависимости от масштаба, функционала и назначения роботов. Рассматриваются примеры практической реализации электронных модулей, предложенной архитектуры системы управления наземными роботами и БПЛА мультикоптерного типа при решении задач сейсморазведки.

Ключевые слова: электроника; робототехника; программно-аппаратного обеспечение; сейсморазведка.

При взаимодействии группы роботов актуальной научно-технической задачей становится организация системного совместного функционирования разных встроенных электронных модулей, отвечающих за оценивание параметров внешней среды, вычисления, электропитания и размещенных на территориально распределенных подвижных объектах [1]. Гетерогенность программно-аппаратного обеспечения как роботов, так и их отдельных подсистем требует новых решений в части интерфейсов и преобразователей, отвечающих за интеграцию данных об окружающей среде, внутреннем состоянии роботов и знаний о предметной области, накопленных в том числе в процессе исполнения задачи.

Разработанная архитектура системы управления роботами состоит из трех уровней: вычислителей, интерфейсов, устройств. Высокоуровневый вычислитель, осуществляющий принятие решений при управлении роботами, имеет базовые интерфейсы, которые могут быть представлены USB, Ethernet или иными вариантами. Уровень интерфейсов разделен на человеко-машинные, внешние коммуникационные интерфейсы и внутрисистемный коммуникационный интерфейс. Уровень устройств связан с высокоуровневым вычислителем посредством внутрисистемного коммуникационного интерфейса. На уровне устройств к системе управления подключаются различные сенсоры, приводы, актуаторы и другие устройства, не требующие передачи значительных объемов информации к высокоуровневому вычислителю [3, 4]. Каждый модуль системы управления имеет подключение к внутрисистемной шине данных роботов и общей шине питания. К модулю могут подключаться сенсоры и исполнительные устройства в зависимости от его назначения. В предложенной архитектуре предусмотрена отдельная и вынесенная за пределы уровней система питания, состоящая из источника питания и устройства управления питанием [2]. Устройство управления питанием осуществляет преобразование уровней напряжения, их контроль, измерение тока,

потребляемого модулями и устройствами, а также другие функции, связанные с питанием роботов.

В докладе рассмотрены примеры реализации систем управления на базе предложенной архитектуры для наземных мобильных роботов и БПЛА мультикоптерного типа, разработанных СПб ФИЦ РАН. Разработанный подход к организации распределенной системы управления позволяет изменять ее конфигурацию в зависимости от числа роботов и их функционального назначения. Использование внутрисистемной коммуникационной шины на уровне устройств позволяет без изменений общей архитектуры системы управления и принципов информационного обмена между модулями подключать дополнительное оборудование к роботам, необходимое для сейсморазведки.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-69-00231, <https://rscf.ru/project/22-69-00231>.

Литература

1. Anikin D., Ryabinov A., Saveliev A., Semenov A. Autonomous Landing Algorithm for UAV on a Mobile Robotic Platform with a Fractal Marker // Interactive Collaborative Robotics: 8th International Conference, ICR 2023. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2023. P. 357–368. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_32.
2. Крестовников К.Д., Ерашов А.А. Разработка архитектуры и обобщенной структуры модулей распределенной системы управления робототехническими комплексами различного назначения // Робототехника и техническая кибернетика, 2022. — Т. 10. — №3. — С. 201–212. — URL: <https://doi.org/10.31776/RTSJ.10305>.
3. Крестовников К.Д. Алгоритмы управления двунаправленной беспроводной системой передачи энергии при перераспределении энергоресурсов в группе наземных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление, 2023. — Т. 24. — №9. — С. 451–461. — URL: <https://doi.org/10.17587/mau.24.481-488>.
4. Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Васюнина Ю.Г., Савельев А.И. Разработка устройства сопряжения для модульной сельскохозяйственной робототехнической платформы // Сельскохозяйственные машины и технологии, 2022. — № 16 (1). — С. 78–88. — URL: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-1-78-88>.

УДК 004.896

Электронные модули управления позиционированием и захватом воздушной манипуляционной системы при операциях с сейсмодатчиком

к. т. н. Крестовников К. Д., д. т. н., профессор Ронжин А. Л.

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН
199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39
ronzhin@iias.spb.su

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) дает существенные преимущества при решении задачи транспортировки датчиков сейсмической активности в труднодоступных или опасных районах. В докладе обсуждается реализация электронных модулей системы управления БПЛА для автоматизированной транспортировки и установки датчиков сейсмической активности. Разработанная архитектура системы управления состоит из трех уровней. На уровне устройств к системе управления могут подключаться различные модули, обеспечивающие функционирование электромеханических систем дополнительного оборудования. Разработанный подход к организации распределенной системы управления позволяет изменять ее конфигурацию в зависимости от функционального назначения БПЛА.

Ключевые слова: электроника; робототехника; программно-аппаратного обеспечение; сейсморазведка.

Одним из перспективных направлений использования БПЛА в сейсмогеологоразведке является транспортировка и установка датчиков сейсмической активности в труднодоступных районах [1]. Для качественных измерений и построения моделей с высоким уровнем идентификации, как правило необходима установка большого числа датчиков в определенных местах целевой зоны геологоразведочных работ. После выполнения сейсморазведки также необходимо осуществить сбор датчиков и их доставку к месту сервисного обслуживания. Современные технологические достижения в области беспилотных авиационных систем, а особенно в направлении автоматизации выполнения полетных заданий, дают возможность уменьшить вовлечение человека в данный процесс.

Рассмотрим обобщенное описание принципа эксплуатации БПЛА для установки и транспортировки сейсмодатчиков следующее. Выполнение полетной миссии до момента посадки реализуется полетным контроллером, а высокая точность позиционирования над точкой установки сейсмодатчика при глобальной навигации достигается за счет использования технологии GNSS RTK (Global Navigation Satellite System with Real Time Kinematic). Перед посадкой выполняется определение и идентификация сейсмодатчика. В процессе посадки при позиционировании управляющие команды для полетного контроллера БПЛА формирует высокоуровневый вычислитель на основе информации полученной при обработке данных с камеры технического зрения [2]. В случае успешной посадки сейсмодатчик попадает в зону функционирования устройства захвата. После завершения процесса посадки высокоуровневый вычислитель передает управляющие команды модулю управления захватом. Сейсмодатчик фиксируется захватным устройством,

и БПЛА может покинуть зону забора датчика. Процесс установки БПЛА в общем аналогичен забору груза, с той разницей, что в месте посадки устройство захвата раскрывается и БПЛА покидает место установки сейсмодатчика.

Модуль управления захватом интегрирован в систему управления (СУ) БПЛА на уровне устройств. Разработанная архитектура СУ состоит из трех уровней с отдельной и вынесенной за пределы уровней системой питания [2]. Система питания состоит из источника питания и устройства управления питанием, которое осуществляет преобразование уровней напряжения, их контроль, измерение тока, потребляемого модулями и устройствами, а также другие функции, связанные с питанием БПЛА. В предложенной архитектуре высокоуровневый вычислитель, осуществляющий принятие решений при управлении БПЛА, имеет базовые интерфейсы, которые представлены USB и Ethernet. Уровень интерфейсов БПЛА представлен внешними и внутрисистемными коммуникационными интерфейсами. Уровень устройств связан с высокоуровневым вычислителем посредством внутрисистемного коммуникационного интерфейса. На уровне устройств к СУ могут подключаться различные электромеханические устройства, такие как захват сейсмодатчиков, сенсоры, приводы и другие системы, не требующие передачи значительных объемов информации к высокоуровневому вычислителю [3, 4]. Каждый модуль СУ имеет подключение к внутрисистемной шине данных БПЛА, в качестве которой выступает CANbus, и общей шине питания. Основными структурными блоками схемотехники модулей являются низкоуровневый вычислитель, одним из вариантов которого может выступать микроконтроллер STM32F103C8T6, трансивер коммуникационной шины, для CANbus SN65HVD230, и преобразователи питающего напряжения. Подключение датчиков к модулю осуществляется через блоки защиты и интерфейсных схем. В зависимости от назначения модуля в состав схемотехнического блока драйверы и коммутаторы могут входить полупроводниковые ключи, электромеханические реле, драйверы коллекторных и бесколлекторных двигателей, такие как ТВ6612 или А4915.

В докладе рассмотрена реализация СУ на базе предложенной архитектуры для БПЛА мультироторного типа, предназначенного для транспортировки и установки сейсмодатчиков. Разработанный подход к организации распределенной системы управления позволяет изменять ее конфигурацию в зависимости от функционального назначения БПЛА и подключать дополнительное оборудование.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда
№ 22-69-00231, <https://rscf.ru/project/22-69-00231>.*

Литература

1. Ерашов А. А., Аникин Д. А., Черских Е. О., Савельев А. И., Брыскин В. М., Агафонов Б. М. Алгоритмы оценивания параметров неоднородной поверхности и управления беспилотным летательным аппаратом при установке сейсмического датчика // ТРУДЫ МФТИ. Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), 2023. — Т. 15. — № 4 (60). — С. 14–30.
2. Anikin D., Ryabinov A., Saveliev A., Semenov A. Autonomous Landing Algorithm for UAV on a Mobile Robotic Platform with a Fractal Marker // Interactive Collaborative Robotics: 8th International Conference, ICR 2023. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2023. P. 357–368. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_32.

3. Крестовников К.Д., Ерашов А.А. Разработка архитектуры и обобщенной структуры модулей распределенной системы управления робототехническими комплексами различного назначения // Робототехника и техническая кибернетика, 2022. — Т. 10. — № 3. — С. 201–212. — URL: <https://doi.org/10.31776/RTSJ.10305>.
4. Крестовников К.Д. Алгоритмы управления двунаправленной беспроводной системой передачи энергии при перераспределении энергоресурсов в группе наземных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление, 2023. — Т. 24. — № 9. — С. 451–461. — URL: <https://doi.org/10.17587/mau.24.481-488>.

УДК 004.8, 004.85, 004.27

Классификация голосовых команд импульсной нейронной сетью, исполняемая с учетом ограничений нейроморфного процессора на разрядность синаптических весов

Рыбка Р. Б., Серенко А. В., Сбоев А. Г., Дёмин В. А.

НИИ «Курчатовский институт»

123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
demin.vyacheslav@mail.ru

Продемонстрировано решение задачи классификации заданных слов на русском языке с приемлемым качеством импульсной нейронной сетью с весовыми коэффициентами формата int8, позволяющей размещению на цифровых нейроморфных процессорах, в том числе российской разработки.

Ключевые слова: спайковые нейронные сети; нейроморфные вычисления; импульсные нейронные сети; классификация голосовых команд; нейроморфный процессор.

Импульсные (спайковые) нейронные сети могут быть размещены на нейроморфных вычислительных устройствах с энергопотреблением порядка десятков мВт, в отличие от единиц-десятков Вт, требуемых для запуска формальных нейронных сетей на традиционных вычислительных архитектурах. Это особенно актуально в задачах потоковой обработки данных на автономных устройствах, и примером такой задачи является распознавание голосовых команд. В данной работе представлен способ получения импульсной нейронной сети, позволяющей размещение на цифровых нейроморфных процессорах, на примере задачи классификации голосовых команд на русском языке.

Задача состоит в классификации звукозаписей длительностью 1 с на наличие или отсутствие одного из следующих слов: «да», «нет», «вверх», «вниз», «налево», «направо», «включи», «выключи», «стоп», «иди», «вперед», «назад», «следуй», «наблюдай», «изучай»; цифры от «ноль» до «девять». Набор из 70899 звукозаписей с этими словами был сгенерирован методом text-to-speech [1]. Каждую аудиозапись представляли 80-канальной мел-спектрограммой, для получения которой применяли дискретное преобразование Фурье с оконной функцией Хэмминга к фрагментам по 25 мс со сдвигом 10 мс.

Архитектура нейронной сети состояла из трех сверточных слоев, с окном свертки 4×4 и сдвигом 2 в обоих направлениях, и двух полносвязных слоев из 32 и 26 нейронов соответственно. После каждого сверточного слоя применялся слой AveragePooling.

Получение спайковой нейронной сети выполнялось в три этапа.

1. Обучение формальной нейронной сети аналогичной архитектуры, все слои которой, включая AveragePooling, имели функцию активации Rectified Linear Unit (ReLU), кроме выходного, имевшего функцию активации softmax. Ко входным весам каждого полносвязного слоя применялся Dropout с вероятностью 0,5.
2. Дообучение полученной нейросетевой модели с учетом ограничения нейроморфного процессора типа «Алтай» (Мотив НТ) на разрядность весовых



коэффициентов методом тренировки с учетом ограничений по квантованию (quantization-aware training) [2] с последующим приведением весов к формату int8.

3. Перенос полученных весов на импульсную нейронную сеть аналогичной архитектуры с моделью нейрона — порогового интегратора (Integrate-and-Fire). При этом пороговые потенциалы нейронов выбирались так, чтобы минимизировать потери информации из-за представления данных ограниченным количеством спайков за время подачи одной звукозаписи (100 мс, что при шаге дискретизации нейропроцессора в 1 мс соответствует значениям от 0 до 100 спайков).

Точность классификации после каждого из этапов составила соответственно 93,4, 93,8 и 91,7 %.

Полученная импульсная нейронная сеть может быть размещена на 16 чипах нейропроцессора «Алтай», имеющих энергопотребление около 60 мВт каждый. Таким образом, продемонстрирована принципиальная возможность реализации интеллектуальной задачи по распознаванию голосовых команд с приемлемой для приложений точностью с энергопотреблением около 1 Вт на базе отечественной нейроморфной вычислительной платформы.

Работа выполнена в рамках тематического плана НИЦ «Курчатовский институт» с использованием оборудования центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса» НИЦ «Курчатовский институт», <http://ckp.nrcki.ru>.

Литература

1. Rybka R., Naumov A., Gryaznov A., Sboev A. Synth-ruSC: Construction and validation of synthetic dataset to solve the problem of keyword spotting in Russian // Neuroinformatics, 2024 (under consideration).
2. Benoit Jacob, Skirmantas Kligys, Bo Chen, Menglong Zhu, Matthew Tang, Howard A., Hartwig A., and Kalenichenko D. Quantization and training of neural networks for efficient integer-arithmetic-only inference // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2018. P. 2704–2713.

УДК 621.38-022.532

Текущее состояние и перспективы освоения технологии энергонезависимой резистивной памяти RRAM в России

Михайлов А. Н.*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
mian@nifti.unn.ru*

Обсуждается современное состояние и перспективы освоения в России технологии энергонезависимой резистивной памяти Resistive Random Access Memory (RRAM) на основе эффекта резистивного переключения в металл-оксидных наноструктурах для реализации новой элементной базы нейроморфных систем искусственного интеллекта.

Ключевые слова: искусственный интеллект; нейроморфная вычислительная система; мемристор; RRAM.

Мемристор и мемристивные системы, позволяющие реализовать нейроморфные вычисления в памяти, обеспечивают один из вариантов развития нового энергоэффективного аппаратного обеспечения технологий искусственного интеллекта [1]. Элементом памяти в этом случае является простая тонкопленочная структура «металл — оксид — металл», которая демонстрирует эффект резистивного переключения. Соответствующие ячейки памяти RRAM изготавливаются с применением коммерческого оборудования и интегрируются с управляющими схемами КМОП. В докладе рассмотрено развитие данной технологии в России на примере научных результатов кооперации Национального центра физики и математики и обсуждаются перспективы перехода к опытно-конструкторским работам, направленным на создание опытных образцов микросхем памяти RRAM и ускорителя нейроморфных вычислений.

Основным результатом, полученным на данный момент, является разработка и реализация на базе ведущих научных организаций и университетов единого технологического подхода к КМОП-интеграции мемристивных наноструктур, обеспечивающего диверсификацию материалов и лабораторных технологий на основе отечественного процесса КМОП КНИ 0,35 мкм. Разработаны научно-технологические решения по созданию элементов и ячеек энергонезависимой резистивной памяти RRAM на основе мемристивных наноструктур с высоким выходом годных и высокой радиационной стойкостью. Данные решения легли в основу создания базовой технологии функциональных блоков и тестовых микросхем RRAM на основе приборного слоя FEOL (front-end-of-line), изготавливаемого в промышленных условиях, и мемристивных структур, изготавливаемых в лабораторных условиях в слоях металлизации BEOL (back-end-of-line). Опытно-конструкторская реализация технологии RRAM обеспечит производство широкого спектра продуктов от микросхем спецстойкой памяти до нейрочипов, нейроинтерфейсов и нейропротезов для медицинских применений.

Технологическое освоение и производство микросхем RRAM позволит решить задачу импортозамещения в части микросхем энергонезависимой памяти для специальных применений, организовать серийное производство специализированного аппаратного обеспечения на базе архитектуры и принципов функционирования

мозга для развития технологий искусственного интеллекта и создания гибридного интеллекта на основе симбиоза искусственных и биологических нейронных сетей.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах».

Литература

1. Mikhaylov A. N. et al. Neuromorphic computing based on CMOS-integrated memristive arrays: current state and perspectives // Supercomputing Frontiers and Innovations, 2023. Vol. 10. № 2. P. 77–103. DOI: 10.14529/jsfi230206.

УДК 621.382

Оптоэлектронная мемристорная нейронная сеть на основе низкоразмерных кристаллов для детектирования, запоминания и распознавания изображения

Панин Г. Н.¹, Капитанова О. О.^{2,3}

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
panin@iptm.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

³ Центр фотоники и двумерных материалов
Московского физико-технического института,
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассмотрен новый подход для энергоэффективной и быстрой обработки визуальной информации с помощью оптоэлектронной мемристорной нейронной сети, изготовленной из фотомемристоров на основе графена, оксида графена и оксисульфида молибдена, для детектирования, запоминания в них и классификации оптической информации.

Ключевые слова: оптоэлектронная нейронная сеть; фотомемристор; нейроморфные сенсоры; распознавание образов; графен; производные графена; оксисалькениды; фотоиндуцированные фазовые переходы.

Введение

Оптоэлектронная нейронная сеть, состоящая из фотомемристоров [1–5], позволяет создать компактную, автономную и энергоэффективную систему распознавания и запоминания визуальной информации, детектируемой в интеллектуальных сенсорах автопилотируемого транспорта в реальном времени [2]. Появление новых двумерных материалов семейства графена открывает уникальные возможности быстрой обработки электрических [6, 7] и оптических [3–5] сигналов в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК) и терагерцового излучения. Энергонезависимые резистивные состояния в мемристорных структурах, изготовленных на основе двумерных кристаллов и квазиодномерных квантовых точек [8, 9], могут контролироваться светом и электрической поляризацией [1], фотоиндуцированными структурными переходами [3] или перестройкой атомов углерода в sp^2 - sp^3 гибридизации в электрическом поле [6, 7]. Такие устройства имеют высокую фоточувствительность [10] и демонстрируют динамическое поведение [4], необходимое для нейроморфных вычислений непосредственно в сенсоре, которое позволяет уменьшить энергетические и временные затраты, связанные с переносом данных между отдельными детектором, памятью и процессором в архитектуре фон Неймана. Это открывает возможность детектировать и обрабатывать электрические и оптические сигналы в памяти-сенсоре, уменьшая энергопотребление и время при обработке сигналов для классификации и распознавания объектов [5].

Оптоэлектронная мемристорная нейронная сеть

В работе рассмотрена оптоэлектронная нейронная сеть, состоящая из матрицы 3×3 фотомемристоров, включенных навстречу друг другу, изготовленных из CVD графена, оксида графена и оксидисульфида молибдена, которая позволяет запоминать и классифицировать визуальную информацию в отдельных сенсорных элементах. Такая оптоэлектронная фотомемристорная нейронная сеть может быть использована для энергоэффективного и быстрого распознавания образов в широком УФ-ИК-диапазоне в автономных системах транспорта.

Заключение

Оптоэлектронные нейронные сети, состоящие из фотомемристоров на основе низкоразмерных кристаллов, перспективны для создания энергоэффективных нейроморфных интеллектуальных систем широкополосного зрения для автопилотирования автономных транспортных средств в реальном времени.

**Работа выполнена при поддержке РФФ проекта № 23-49-00159,
государственного задания № 075-00296-24-00 (П.Г.Н.).**

Литература

1. Wang W., Panin G., Fu X. et al. MoS₂ memristor with photoresistive switching // Sci Rep., 2016. Vol. 6. P. 31224.
2. Panin G.N. Low-Dimensional Layered Light-Sensitive Memristive Structures for Energy-Efficient Machine Vision // Electronics, 2022. Vol. 11. № 4. P. 619.
3. Fu X. et al. Molybdenum Disulfide Nanosheet/Quantum Dot Dynamic Memristive Structure Driven by Photoinduced Phase Transition // Small, 2019. Vol. 15. P. 1903809.
4. Panin G.N. Optoelectronic dynamic memristor systems based on two-dimensional crystals // Chaos, Solitons & Fractals, 2021. Vol. 142. P. 110523.
5. Fu X., Li T., Cai, B. et al. Graphene/MoS_{2-x}O_x/graphene photomemristor with tunable non-volatile responsivities for neuromorphic vision processing // Light Sci. Appl., 2023. Vol. 12. P. 39.
6. Panin G.N., Kapitanova O. O., Lee S. W., Baranov A. N., Kang T. W. Resistive Switching in Al/Graphene Oxide/Al Structure // Jpn. J. Appl. Phys., 2011. Vol. 50. P. 070110.
7. Kapitanova O. O. et al. Direct patterning of reduced graphene oxide/graphene oxide memristive heterostructures by electron-beam irradiation // Journal of Materials Science & Technology, 2020. Vol. 38. P. 237–243.
8. Fu Xiao et al. Tunable UV-visible absorption of SnS₂ layered quantum dots produced by liquid phase exfoliation // Nanoscale, 2017. Vol. 9. № 5. P. 1820–1826.
9. Kovaleva N. N. et al. Efficient green emission from edge states in graphene perforated by nitrogen plasma treatment // 2D Materials, 2019. Vol. 6. P. 045021.
10. Fu Xiao et al. Geometry-asymmetric photodetectors from metal–semiconductor–metal van der Waals heterostructures // Materials Horizons, 2022. Vol. 9. P. 3095–3101.

УДК 004.383.8.032.26

Особенности аппаратной реализации режимов обучения в нейроморфных архитектурах на мультибитных мемристивных элементах

Андреева Н. В., Дудкин А. П., Маврин И. А., Рындин Е. А.*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)**197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
nvandr@gmail.com*

Проведен анализ эффективности правил обучения нейроморфных архитектур, пригодных для аппаратной реализации. Рассмотрены варианты и особенности интеграции режима обучения на-чипе с использованием мультибитных мемристивных кроссбар-массивов. Проведена сравнительная оценка их эффективности.

Ключевые слова: нейроморфные электронные модули; обучение на-чипе; мультибитные мемристивные элементы.

Использование мемристивных элементов в структуре кроссбар-массивов для аппаратной реализации векторно-матричного умножения потенциально обеспечивает нейроморфным архитектурам существенный выигрыш в энергоэффективности.

Однако, сопряжение мультибитных мемристивных кроссбар-массивов с цифровой частью нейроморфных архитектур осложняет интеграцию режима обучения на-чипе, т. к. требует введения схем верификации и коррекции весовых коэффициентов (уровней проводимости) мемристивных элементов кроссбар-массивов. Данное обстоятельство нивелирует преимущества использования мемристивной ЭКБ при аппаратной реализации наиболее часто используемых правил обучения на основе постулата Хебба и обратного распространения ошибки.

Существующие варианты модификации схем мемристивных кроссбар-массивов, например, переход к совместному использованию 2T2R и 1T1R ячеек в слоях сети с введением пороговых алгоритмов обучения (STELLAR архитектура [1]), требуют частичного программного предобучения и при аппаратной реализации работают преимущественно на тестовых базах данных.

Таким образом, несмотря на достижимое количество промежуточных уровней проводимости в современных мемристивных элементах (до 2048 [2]), теоретически обеспечивающее точность, необходимую для апгрейда весовых коэффициентов в процессе аппаратного обучения, сложность реализации режима обучения на практике ограничивается цифровыми подходами к проектированию нейроморфных архитектур.

Для решения проблемы повышения эффективности аппаратной реализации режима обучения нами проведен комплекс исследований, включающий разработку и технологическую реализацию мультибитных мемристивных элементов, обеспечивающих до 165 уровней проводимости, разработку схем и топологий параметризуемых аналоговых функциональных блоков для более эффективного (по сравнению с цифровым подходом) аппаратного исполнения алгоритмов обучения различных нейроморфных архитектур, метод и программные средства

автоматизированного проектирования нейронных сетей на базе разработанных мультибитных мемристивных элементов и аналоговых функциональных блоков с учетом разброса и нелинейности характеристик мемристоров и падений напряжения на соединительных линиях мемристивных кроссбар-массивов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2020- 0013.

1. Wenbin Zhang et al. Edge learning using a fully integrated neuro-inspired memristor chip // Science, 2023. 381, 1205–1211.
2. Rao M., Tang H., Wu J. et al. Thousands of conductance levels in memristors integrated on CMOS // Nature, 2023. 615, 823–829.

УДК 681.5.015

Программная среда для моделирования элементов энергонезависимой памяти

д. ф.-м. н., Абгарян К. К.*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, к. 2
kristal83@mail.ru*

Применение программных средств для решения различных прикладных задач в области микроэлектроники на сегодня является важной составляющей при проведении исследовательских работ, особенно в конкурентной области, связанной с созданием новых элементов энергонезависимой памяти. В связи с этим, создание российского программного обеспечения — программной среды для автоматизированного проектирования элементов энергонезависимой памяти, применяемых в системах искусственного интеллекта, является весьма актуальным. В работе представлена многомасштабная схема моделирования, реализованная в программной среде САПР «СоВА», основной функционал системы и примеры решаемых задач.

Ключевые слова: программные средства; система автоматизированного проектирования (САПР); энергонезависимая память модели; мемристор; искусственный интеллект.

Современные микроэлектронные устройства в связи с большой сложностью невозможно спроектировать без применения компьютерных технологий, которые позволяют существенно ускорить и удешевить процесс их создания. Разработкой программных средств для решения задач, связанных с моделированием новых материалов и устройств для микроэлектроники активно занимаются такие компании как Synopsys, Silvaco, Cadence, Siemens, Mentor Graphics. С точки зрения моделирования физических процессов такие системы обычно опираются на модели дрейф-диффузии, служащие для описания динамики электронов и ионов в устройствах, а также на модели поля, описывающие силы, определяющие динамику. При этом, для учета взаимовлияния динамических моделей и моделей поля осуществляется их согласование. В ряде систем для учета квантовых эффектов применяется атомистическое моделирование. В большинстве случаев использование многомасштабного компьютерного моделирования [1, 2] позволяет получить детальную картину процесса, недоступную для экспериментального наблюдения.

В работе представлен основной функционал программной среды для моделирования элементов энергонезависимой памяти САПР «СоВА» на основе технологий ReRAM, FeRAM, MRAM и многомасштабная схема моделирования, предполагающая рассмотрение физических явлений в материалах и приборах микроэлектроники, начиная с явлений атомарного и молекулярного масштаба и закачивая характеристики приборами структур. Так при моделировании переключательной динамики ReRAM элемента — мемристора существенно учитывалась взаимосвязь процессов генерации/рекомбинации кислородных вакансий, транспорта ионов под действием электрического поля, взаимодействия ионов с электродами, туннелирования электронов, нагрева элемента вследствие протекания электрического тока. При анализе механизмов переключения в FeRAM элементах исключительно



важным является поиск стабильных атомных конфигураций, обуславливающих изменения поляризации, что требует детальных квантово-механических расчетов. Это же касается моделирования динамики намагничивания MRAM элементов.

Наряду с вычислительно затратными детальными математическими моделями, в САПР «СоВА» большую роль играют приближенные (компактные) модели [3]. Они основаны на представлении элемента как нелинейной динамической системы относительно переменной состояния, связанной с ключевой характеристикой процесса переключения. Применительно к ReRAM в качестве такой переменной выступает концентрация кислородных вакансий. Аналогичные уравнения относительно поляризации и намагниченности получены для FeRAM и MRAM элементов. В связи тем, что компактные модели весьма экономичны в вычислительном отношении, их можно эффективно использовать при многовариантном анализе и имитационном моделировании схемотехнических решений.

Разрабатываемое российское программное обеспечение, является одним из важных аспектов для успешного анализа работы устройств энергонезависимой памяти, применяемых в системах искусственного интеллекта. Оптимизация структур на этапе компьютерного моделирования позволит избежать дорогостоящих экспериментов, снизить время и затраты на создание новых устройств энергонезависимой памяти, что делает представленную систему мощным инструментом в разработке технологий следующего поколения.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда
(проект № 23-91-01012).*

Литература

1. Абгарян К. К. Многомасштабное моделирование в задачах структурного материаловедения. — М.: МАКС Пресс, 2017. — 284 с.
2. Abgaryan K. K., Gavrilov E. S. Integration platform for multiscale modeling of neuromorphic systems // Informatics and Applications, 2020. Vol. 14 (2). P. 104–110. DOI: <https://doi.org/10.14357/19922264200215>. (Scopus).
3. Abgaryan K. K., Morozov A. Yu., Reviznikov D. L. Hybrid Approach for Modeling Memristive Elements // Physica status solidi (b), 2024. 2400058. DOI: 10.1002/pssb.202400058.

УДК 621.382

Многоуровневые мемристоры в матричном кроссбар-исполнении на базе структур оксид-наноккомпозит для нейроморфных приложений

Рыльков В. В.¹, Ильясов А. И.¹, Емельянов А. В.¹, Мацукатова А. Н.¹, Ичеткин Д. В.¹, Суражевский И. А.¹, Черноглазов К. Ю.¹, Ситников А. В.^{1,2}, Занавескин М. Л.¹, Демирин В. А.¹

¹ НИИЦ «Курчатовский институт»

123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

vyrylkov@mail.ru

² Воронежский государственный технический университет

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Разработаны массивы мемристорных кроссбар-элементов 16×16 на основе нанослоев наноккомпозита CoFeB-LiNbO_3 и $\alpha\text{-LiNbO}_3$ с инкапсулированными слоями Si_3N_4 , демонстрирующие не менее 16 резистивных состояний. Представлена физическая компактная модель описания их резистивного переключения. Приведены оценки времен и энергий переключения. Показаны возможности применений на примерах создания сверточной сети и сети на основе адаптированной архитектуры MLP-Mixer.

Ключевые слова: массивы кроссбар-мемристоров; многоуровневое резистивное переключение; нейроморфные приложения.

Повышенный интерес к разработке нейроморфных вычислительных систем (НВС) на базе многоуровневых мемристоров объясняется их высокой производительностью при малом энергопотреблении для решения задач искусственного интеллекта. Особое место при этом занимают импульсные нейронные сети; которые могут позволить значительно снизить энергопотребление; приблизив его к биологическому прототипу; а кроме того реализовать обучение НВС как с учителем; так и без него; на основе биоподобных правил изменения мемристивных весов типа STDP (spike timing dependent plasticity).

В работе разработаны массивы мемристорных кроссбар-элементов 16×16 площадью $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ на основе наноккомпозита (НК) CoFeB-LiNbO_3 толщиной 200 нм и прослойки $\alpha\text{-LiNbO}_3$ (20 нм), инкапсулированных слоем Si_3N_4 (7 нм), полученным плазмо-химическим осаждением при 300°C . Показано, что элементы демонстрируют не менее 16 резистивных состояний при количестве циклов резистивного переключения (РП) более 10^5 . Развита модель описания пластичности мемристорных структур, учитывающая особенности прыжкового электрического транспорта в $\alpha\text{-LiNbO}_3$ [1, 2]. Модель хорошо описывает вольт-амперные характеристики (ВАХ) мемристорных кроссбар-массива, а найденные при подгонке ВАХ эффективные микроскопические параметры позволяют предсказать результат изменения проводимости согласно STDP пластичности, зависящей от времени прихода импульсов. Разработан новый подход оценки времени РП t_{RS} , который основан на анализе зависимости отношения начального и конечного сопротивлений R_1/R_2 от длительности $dt = 100 \text{ нс} - 50 \text{ мс}$ переключающего импульса фиксированной амплитуды.



Показано, что предельное (внутреннее) t_{RS} может быть меньше 1 нс, а энергия РП достигать около 10 пДж.

Продемонстрирована возможность создания гибридной сверточной нейронной сети (СНС), состоящей из аппаратного фиксированного, предварительно обученного экстрактора признаков, реализованного на массивах НК кроссбар-мерристоров, и обучаемого программного классификатора. Сформированная СНС с двумя аппаратными сверточными фильтрами позволила классифицировать бинаризованный набор данных Fashion-MNIST с точностью ~84% [3].

Реализована аппаратная НВС на основе матрицы НК кроссбар-мерристоров, способная классифицировать векторы: «0101» и «1010». Полученные характеристики использованы для моделирования адаптированной сети с перспективной архитектурой MLP-Mixer (миксер многослойных перцептронов), которая продемонстрировала точность классификации ($94,7 \pm 0,3$)% на наборе рукописных цифр MNIST [4].

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 22-19-00171).

Литература

1. Дёмин В. А., Ильясов А. И., Рыльков В. В., Кашкаров П. К., Ковальчук М. В. Модель механизма многофиламентного резистивного переключения мемристора с прыжковым типом проводимости // Российские нанотехнологии, 2023. — Т. 18. — № 2. — С. 276–288.
2. Емельянов А. В., Никируй К. Э., Ильясов А. И., Цывкунова Е. А., Суражевский И. А., Демин В. А., Линь Я., Тао Е., Рыльков В. В. Компактная модель описания пластичности мемристоров на основе нанослоев LiNbO_3 и композита $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ по биоподобному правилу STDP // Российские нанотехнологии, 2024. — Т. 19. — № 1. — С. 121–126.
3. Matsukatova A. N., Ilyasov A. I., Nikiruy K. E., Kukueva E. V., Vasiliev A. L., Goncharov B. V., Sitnikov A. V., Zhanaveskin M. L., Bugaev A. S., Demin V. A., Rylkov V. V., Emelyanov A. V. Convolutional neural network based on crossbar arrays of $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ nanocomposite memristors // Nanomaterials, 2022. Vol. 12 (19). P. 3455–3464.
4. Iliasov A. I., Matsukatova A. N., Emelyanov A. V., Slepov P. S., Nikiruy K. E., Rylkov V. V. Adapted MLP-Mixer network based on crossbar arrays of fast and multilevel switching $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ nanocomposite memristors // Nanoscale Horiz., 2024. Vol. 9. P. 238–247.

УДК 537.9

Новые мемристивные структуры М/НК/Д/М**Ситников А. В.^{1,2}, Калинин Ю. Е.¹, Бабкина И. В.¹, Никонов А. Е.¹, Шакуров А. Р.¹, Демин В. А.², Емельянов А. В.², Рыльков В. В.²**¹ Воронежский государственный технический университет

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

sitnikov04@mail.ru

² НИЦ «Курчатовский институт»

123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Показано влияние элементного состава диэлектрической прослойки и наноконструкта на комплекс мемристивных свойств и устойчивость характеристик к термическому воздействию структур М/НК/Д/М конденсаторного типа. Выявлено влияние резистивных переключений на электрические свойства наноконструкта.

Ключевые слова: резистивное переключение; наноконструкт; мемристоры; ионно-лучевое напыление.

Мемристивные структуры являются основным функциональным элементом для построения нейроморфных вычислительных систем. Одним из перспективных направлений создания мемристивных элементов являются диодные структуры металл/наноконструкт/диэлектрик/металл (М/НК/Д/М). НК обеспечивает многофиламентный характер резистивного переключения (РП) мемристора, что улучшает стабильность резистивных характеристик мемристивного элемента, реализует пластичность индуцированных резистивных состояний, создает условия нелинейности ВАХ в низкоомном состоянии, способствует режиму мягкой формовки и уменьшает требования к качеству диэлектрического покрытия.

Исследуемая нами ранее мемристивная структура М/НК/Д/М на основе НК — $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ и Д — LiNbO_3 демонстрирует биполярное РП с величиной отношения высокоомного (R_{off}) к низкоомному (R_{on}) резистивных состояний $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} \approx 100$ и числом циклов РП $> 10^5$. Однако, мемристивные свойства данной структуры деградируют при термической обработке выше 200°C .

Задачей нашего исследования было подтвердить влияние НК на реализацию эффекта многофиламентного резистивного переключения мемристивных структур М/НК/Д/М и повышение их устойчивости к термическим воздействиям путем изменения элементного состава как НК, так и Д. Были изучены структуры: $\text{Cu}/\text{CoFeB}-\text{SiO}_2/\text{LiNbO}_3/\text{Cr}/\text{Cu}/\text{Cr}/\text{ситалл}$ (1), $\text{Cu}/\text{CoFeB}-\text{SiO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Cr}/\text{Cu}/\text{Cr}/\text{ситалл}$ (2), $\text{Cu}/\text{CoFeB}-\text{SiO}_2/\text{HfVO}_2/\text{Cr}/\text{Cu}/\text{Cr}/\text{ситалл}$ (3) и $\text{Cu}/\text{CoFeB}-\text{SiO}_2/(\text{Zr}_{92}\text{Y}_8)\text{O}_2/\text{Cr}/\text{Cu}/\text{Cr}/\text{ситалл}$ (4). Все они показали биполярное РП, хороший комплекс мемристивных свойств и повышенную до 350°C термическую стабильность. Однако, структуры 2–4 имеют недостаточное количество (несколько сот) обратимых РП. Показано, что эту проблему удается решить введением дополнительного слоя (Ta_2O_5 или Nb_2O_5) в качестве резервуара кислородных вакансий. Проведена оценка степени нелинейности мемристивных структур в состоянии R_{on} , как $I(U)/I(U/2)$. Показано изменение электрических свойств НК в процессе РП.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-00171.



УДК 621.382; 004.383.8.032.6

Быстродействие и точность компактных схмотехнических моделей мемристора на гладких и табличных функциях

Удовиченко С. Ю., Бусыгин А. Н., Ибрагим А. Х. А., Писарев А. Д., Шулаев Н. А.

*Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
udotgu@mail.ru*

Представлены разработанные простые компактные схмотехнические многофиламентные модели резистивного переключения биполярного мемристора с контролируемой многоуровневой настройкой проводимости, построенные на гладких и табличных функциях. Проведено сравнение быстродействия и точности этих моделей, которые отличаются более простыми уравнениями для тока и параметра состояния и лучшим согласием с экспериментальными вольт-амперной кривой и кривой синаптической пластичности по сравнению с известными схмотехническими моделями. Вторая модель обладает лучшей точностью воспроизведения вольт-амперной характеристики и меньшим временем расчета. Упрощенное дискретное описание процесса резистивного переключения в этих моделях позволяет моделировать большие кроссбары без значительных вычислительных мощностей.

Ключевые слова: мемристор; схмотехническая модель; аппроксимация гладкими и табличными функциями; вольт-амперная характеристика; кривая синаптической пластичности; оценка быстродействия и точности моделей.

Разработана простая компактная схмотехническая многофиламентная модель резистивного переключения биполярного мемристора с контролируемой многоуровневой настройкой проводимости; построенная на гладких функциях. На рис. 1а представлена эквивалентная электрическая схема мемристора; в которой резисторы R_i представляют собой филаменты; понижающие общее сопротивление мемристора при открытии соответствующих ключей.

Предлагаемая модель отличается более простыми уравнениями для тока и параметра состояния и лучшим согласием с экспериментальными вольт-амперной кривой [1] (рис. 1б) и кривой синаптической пластичности [2] (рис. 1в) по сравнению с известными схмотехническими моделями, что проявляется в более высоком значении коэффициента детерминации для модельной и экспериментальной ВАХ. С ростом числа филаментов в предлагаемой модели общее число параметров возрастает медленнее чем в других работах, что соответствует более быстрой и простой настройке модели на экспериментальные данные.

Разработана достаточно простая компактная схмотехническая многофиламентная модель резистивного переключения биполярного мемристора с контролируемой многоуровневой настройкой проводимости, построенная на табличных функциях. В отличие от моделей с гладкими функциями, где изначально делается предположение о форме зависимостей тока и параметра состояния от напряжения и времени, предлагаемый способ построения модели восстанавливает эти

зависимости непосредственно из экспериментальных данных с помощью кусочно-линейных аппроксимаций. Такой подход требует меньших вычислительных ресурсов при расчете модели по сравнению с использованием гладких нелинейных функций. Система уравнений модели включает табличную функцию для электрического тока от приложенного напряжения и параметра состояния и табличную функцию изменения параметра состояния от приложенного напряжения и текущего значения параметра состояния. Реализация модели в виде электрической схемы представлена на рис. 2а. Так как ВАХ мемристоров в предельных состояниях записывается в модель непосредственно из эксперимента, модельные ВАХ в высокопроводящем и высокопроводящем состояниях полностью повторяют экспериментальные (рис. 1б).

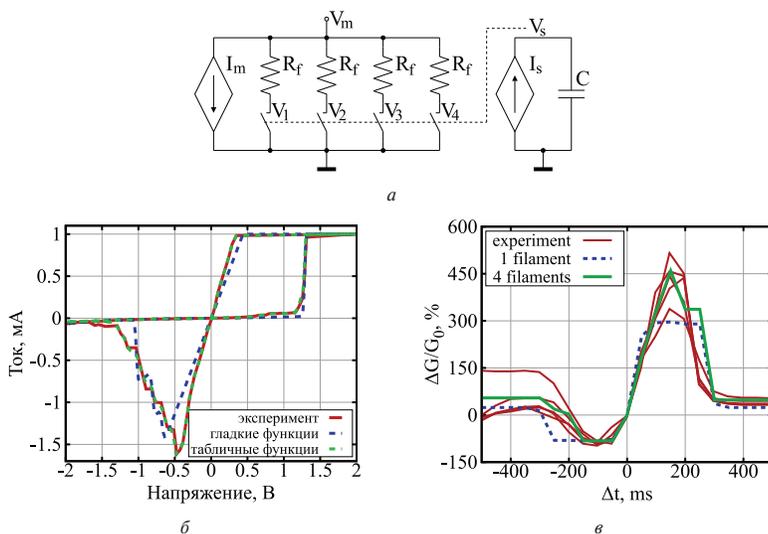


Рис. 1. Электрическая схема многофиламентного мемристора (а); сравнение модельных и экспериментальных вольт-амперных характеристик [1] (б) и кривых синаптической пластичности [2] (в)

Для проверки тезиса об меньшем использовании вычислительных ресурсов моделью на основе табличных функций был выполнено моделирование работы (100 мс) схемы матрично-векторного умножения с разными размерами мемристорных кроссбар массивов (рис. 2б).

Из рис. 2б. видно, что расчет модели с использованием табличных функций выполняется быстрее, чем расчет модели с использованием гладких функций. Кроме этого, модель с использованием табличных функций лучше воспроизводит кривую ВАХ по сравнению с моделью, использующей гладкие функции.

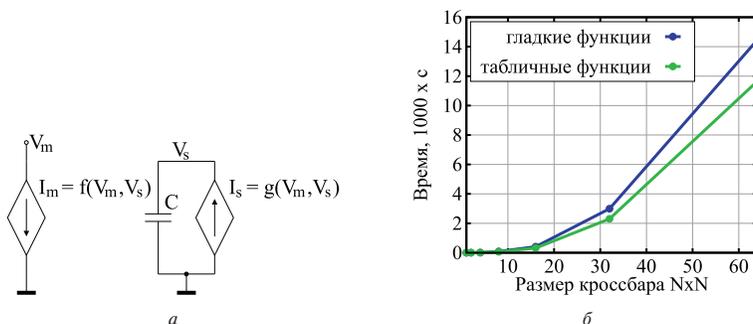


Рис. 2. Электрическая схема модели мемристора с использованием табличных функций (а); зависимость времени расчета электрической схемы от размера мемристорного кроссбара массива при использовании разных моделей (б)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00171, <https://rscf.ru/project/24-21-00171>.

Литература

1. Matsukatova A. N., Vdovichenko A. Y., Patsaev T. D. et al. Scalable nanocomposite parylene-based memristors: Multifilamentary resistive switching and neuromorphic applications // Nano Research, 2023. Vol. 16. P. 3207–3214.
2. Nikiruy K. E., Emelyanov A. V., Demin V. A., Sitnikov A. V., Minnekhanov A. A., Rylkov V. V., Kashkarov P. K., Kovalchuk M. V. Dopamine-like STDP modulation in nanocomposite memristors // AIP Advances, 2019. Vol. 9. Art.065116.

УДК 53.06

Теоретическое и экспериментальное исследование процессов многофиламентарного переключения элементов энергонезависимой резистивной памяти, необходимых для создания нейроморфных систем

Ковешников С. В., Ванькаев А. С., Клюкина Е. В., Федотов М. И.
Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН
142432, Московская область, г. Черноголовка
skoveshnikov@iptm.ru

В данной работе проведено моделирование процессов плавного (аналогового) переключения элементов резистивной памяти на основе оксидов титана и гафния. Показано, что определяющим фактором достижения многоуровневого резистивного переключения является суммарное действие множественных проводящих филаментов. Разработанная нами модель многофиламентарного переключения получила экспериментальное подтверждение. Полученные результаты имеют большое значение для создания элементов памяти, способных работать в качестве искусственных синапсов.

Ключевые слова: элементы резистивной памяти; оксид титана; оксид гафния; моделирование; многоуровневое переключение; нейроморфные системы.

Матрицы энергонезависимой резистивной памяти (RRAM), элементы которых демонстрируют надежное и воспроизводимое многоуровневое резистивное переключение, будут иметь большое значение для разработки новых, более эффективных элементов нейроморфных устройств, в которых элементы резистивной памяти будут выполнять роль искусственных синапсов. Несмотря на прогресс в разработке многоуровневых элементов резистивной памяти на основе оксидов металлов, их практическое использование в матрицах памяти большого объема для нейроморфных систем ограничено отсутствием надежного способа создания элементов памяти с воспроизводимыми характеристиками. Для достижения многоуровневого переключения важную роль играет процесс переключения в высокоомное резистивное состояние (Reset), во время которого проводимость через диэлектрик контролируется величиной максимального приложенного напряжения. На основании анализа литературных данных и полученных нами экспериментальных результатов можно сделать вывод о том, что изменение тока в режиме Reset может быть резким (sharp Reset) или плавным (gradual Reset) даже для одной и той же ячейки памяти. Для достижения многоуровневого переключения плавный Reset является ключевым фактором. Таким образом, выяснение физического механизма, ответственного за плавное изменение тока, протекающего через элемент резистивной памяти в режиме Reset является важной научной задачей, решение которой позволит создавать мемристорные структуры с заданными физическими свойствами. В ходе проведенных нами исследований элементов памяти на основе оксида титана, характеризующихся филаментарным механизмом резистивного переключения и ярко выраженным плавным переключением в режиме Reset, нами получены данные, свидетельствующие о достижении нескольких надежных резистивных



состояний (рис. 1). Для объяснения полученных результатов нами разработана гипотеза о коллективном воздействии нескольких параллельно включенных проводящих филаментов разной длины на изменение проводимости в режиме Reset. Результаты проведенных экспериментов (рис. 1) подтвердили правильность разработанной гипотезы и проведенных расчетов.

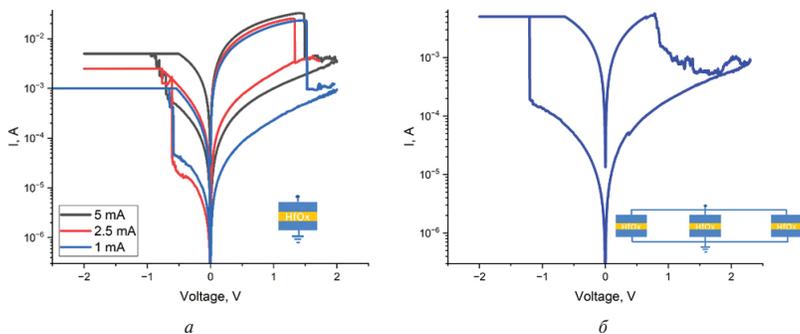


Рис. 1. (а) Вольт-амперные характеристики трех однофиламентных элементов резистивной памяти при различных максимальных токах. (б) ВАХ тех же ячеек, соединенных параллельно

Данная работа выполнена в рамках государственного задания 075-00296-24-00.

УДК 004.9 + 004.4

Особенности аппаратной реализации искусственных нейронных сетей на базе мемристивных устройств

Щаников С. А.

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23*

Доклад посвящен вопросам создания аппаратных ускорителей искусственных нейронных сетей для решения задач в области искусственного интеллекта. Рассмотрен подход, при котором основная часть вычислений выполняется в аналоговом виде с применением кроссбар массивов мемристивных устройств.

Ключевые слова: искусственный интеллект; мемристивные устройства; нейро-морфные вычисления; нейронные сети; нейропроцессор.

Искусственные нейронные сети (ИНС) хорошо зарекомендовали себя в решении различных задач, таких как обработка естественного языка, распознавание изображений, классификация объектов и т.д. При этом с каждым годом эффективность функционирования ИНС возрастает не только за счет качественных изменений в теории их создания, таких как разработка новых архитектур и подходов к обучению, но и через увеличение количества обучаемых параметров, что влечет за собой увеличение энергопотребления и требуемой вычислительной мощности устройств, на которых они исполняются. Классические компьютеры, построенные на основе архитектуры фон Неймана, имеют низкую энергоэффективность и высокие временные задержки при исполнении ИНС. Это связано с тем, что на доступ к памяти и получение весов моделей ИНС и других данных, тратится тактов процессора больше, чем на непосредственно обработку этих данных [1].

Одним из возможных решений сложившейся проблемы, является переход от архитектуры фон Неймана к архитектурам, основанным на вычислениях в памяти, в которых одно и то же устройство осуществляет хранение и обработку информации [1]. Как показывают результаты обзоров, мемристивные устройства являются наиболее перспективными кандидатами на роль аппаратных синапсов [2] в системах вычислений в памяти. Объединение мемристивных устройств в кроссбар-массивы (массивы мемристивных устройств, в которых они располагаются на пересечении входных и выходных шин) позволяет выполнять операцию матричного умножения (одну из наиболее частых и энергозатратных операций в ИНС) за один такт благодаря законам Ома и Кирхгофа [3]. Кроме того, мемристивные устройства могут имитировать биологическую синаптическую пластичность [4].

Доклад посвящен рассмотрению современного состояния и особенностей аппаратной реализации ИНС на базе кроссбар-массивов мемристивных устройств. Также в докладе будут рассмотрены аппаратные реализации различных архитектур ИНС на базе кроссбар-массивов 32x8 1T1R, выполняемые в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект 9.1 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах»).



Литература

1. Huang X. et al. In-memory computing to break the memory wall // Chinese Physics B, 2020. Vol. 29. № 7. P. 078504.
2. Mikhaylov A. N. et al. Neuromorphic computing based on CMOS-integrated memristive arrays: current state and perspectives // Supercomputing Frontiers and Innovations, 2023. Vol. 10. № 2. P. 77–103.
3. Aguirre F. et al. Hardware implementation of memristor-based artificial neural networks // Nature communications, 2024. Vol. 15. № 1. P. 1974.
4. Surazhevsky I. A. et al. Noise-assisted persistence and recovery of memory state in a memristive spiking neuromorphic network // Chaos, solitons & fractals, 2021. Vol. 146. P. 110890.

УДК 621.38-022.532

Перспективы применения легированных азотом углеродных нанотрубок в нейроморфных системах

Ильина М. В.¹, к. т. н., Соболева О. И.², Ильин О. И.², к. т. н.¹ Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологии, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е
mailina@sfedu.ru² Южный федеральный университет,
Научно-исследовательская лаборатория технологии
функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е

Продемонстрирована возможность легированных азотом углеродных нанотрубок преобразовывать повсеместно распространенные механические воздействия окружающей среды в электрический потенциал величиной до сотен мВ, что может быть использовано для создания источников питания и интеллектуальных сенсоров нейроморфных систем.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; легирование азотом; пьезоэлектрический эффект; сенсоры; наногенераторы.

Одним из направлений развития современных нейроморфных систем является разработка миниатюрных источников питания для нейроморфных процессоров и интеллектуальных сенсоров, способных обеспечить их автономную работу и возможность встраивания в носимые устройства [1, 2]. В настоящий момент продемонстрированы первые нейроморфные системы с автономным питанием на основе последовательного соединения мемристивных элементов и пьезоэлектрических наногенераторов (ПЭНГ) [2]. Однако остается ряд нерешенных задач, направленных на уменьшение размера элемента питания и согласование выходных параметров ПЭНГ и входных параметров мемристивных элементов. В данной работе продемонстрированы перспективы использования легированных азотом углеродных нанотрубок (N-УНТ) для решения обозначенных задач путем создания миниатюрных ПЭНГ, способных преобразовывать повсеместно распространенные механические воздействия окружающей среды в электрический потенциал величиной до сотен мВ, и интеллектуальных сенсоров, в том числе для мониторинга жизнедеятельности человека [3, 4]. В основе работы ПЭНГ и сенсоров на N-УНТ лежит пьезоэлектрический эффект, связанный с встраиванием в структуру нанотрубки азота пиррольного типа и, как следствие, образованием в полости бамбукообразных перемычек, представляющих собой искривленную графеновую плоскость [4].

Проведены экспериментальные исследования и показано, что значения выходного напряжения макета ПЭНГ на основе массива N-УНТ зависит от амплитуды и частоты внешних колебаний и достигают $\pm 0,25$ В при воздействии частотой 30 Гц и амплитудой 50 мкм. Результаты моделирования поверхностного потенциала для единичных N-УНТ при аналогичной деформации показали значения потенциала от $-0,58$ до $0,28$ В, что хорошо коррелирует с результатами эксперимента. Кроме того, массивом N-УНТ была продемонстрирована генерация тока величиной до 50 нА (при сопротивлении нагрузки 10 МОм) под действием вибраций,



вызванных шагами, разговорами и движениями пальцев человека. Установлено, что чувствительность макета к внешним механическим воздействиям существенно зависит от силы прижима верхнего электрода к вершинам N-УНТ, что связано с изменением частотного диапазона работы макета. Полученные результаты открывают широкие перспективы использования N-УНТ для разработки как наногенератора для автономного питания нейроморфных процессоров, так и высокочувствительного сенсора деформации.

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ №22-79-10163,
в Южном федеральном университете.*

Литература

1. Shi J., Wang Z., Tao Y. et al. Self-Powered Memristive Systems for Storage and Neuro-morphic Computing // *Frontiers in Neuroscience*, 2021. Vol. 15. P. 662457.
2. Kim B. Y., Lee W. H., Hwang H. G. et al. Resistive switching memory integrated with nanogenerator for self-powered bioimplantable devices // *Advanced Functional Materials*, 2016. Vol. 26. P. 5211–5221.
3. Илина М. В. et al. Anomalous piezoelectricity and conductivity in aligned carbon nanotubes // *J. Mater. Chem. C*, 2021. Vol. 9. № 18. P. 6014–6021.
4. Илина М. В., Илин О. И., Осотова О. И. et al. Pyrrole-like defects as origin of piezoelectric effect in nitrogen-doped carbon nanotubes // *Carbon*, 2022. Vol. 190. P. 348–358.
5. Илина М. В., Soboleva O. I., Polyvianova M. R. et al. Study of the piezoelectric properties of nitrogen-doped carbon nanotubes for the development of energy-efficient nanogenerators // *Nanobiotechnology Reports*, 2023. Vol. 18. № 6. P. 858–864.

УДК 538.9

Нанокompозитные мемристоры парилен- MoO_x для эффективной квантизации весов в нейроморфных системах

Емельянов А. В., Трофимов А. Д., Мацукатова А. Н., Несмелов А. А.,
Демин В. А.

НИИ «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
emelyanov_av@nrcki.ru

Изучено влияние параметров изготовления нанокompозитных структур парилен- MoO_x на их мемристивные характеристики. При концентрации MoO_x 50 % мемристивные структуры демонстрируют наилучшие характеристики. Продемонстрирована возможность использования мемристоров для построения эффективных нейроморфных систем с квантизованными весами.

Ключевые слова: мемристор; нанокompозит; парилен; квантизация весов; нейроморфные системы.

В настоящее время нейроморфные системы (НС) на основе мемристоров считаются перспективными для аппаратной реализации эффективных нейронных сетей для решения задач искусственного интеллекта [1]. Основной проблемой в аппаратной реализации НС является их сильная зависимость от присущего мемристорам разброса характеристик [2]. Для уменьшения разброса характеристик применяется подход внедрения неорганических наночастиц в аморфную диэлектрическую матрицу мемристоров [3]. Перспективными считаются мемристоры на основе парилена, т. к. они обладают удовлетворительными мемристивными характеристиками, могут быть реализованы в кроссбар-архитектуре в том числе на гибких подложках, а также изменять свое резистивное состояние по биоподобным правилам [4–6]. Кроме того их мемристивные характеристики могут быть улучшены при внедрении графеновых барьерных слоев [7] и наночастиц Ag [8]. В данной работе представлены результаты изучения влияния внедрения наночастиц MoO_x в матрицу парилена на их мемристивные характеристики, а также показана возможность их использования для построения НС с квантизованными (дискретизованными) весами.

Синтез нанокompозитов на основе парилен- MoO_x проводился с помощью метода газофазной полимеризации на поверхности подложки [9]. В качестве подложки использовалось стекло с нанесенным оксидом индия олова в качестве нижнего электрода либо кремний с золотыми электродами. Верхние электроды из меди осаждались методом магнетронного распыления через теневую маску. Была изготовлена серия образцов с разной концентрацией MoO_x от 0 до 100 %. Мемристивные характеристики (выносливость, надежность, отношение $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$, пластичность, энергия переключения) измерены на аналитической зондовой станции Cascade Microtech PM5 при помощи двухканального источника-измерителя Keithley 2636B и генератора Keysight 81150A.

В работе показано, что внедрение MoO_x в матрицу парилена приводит к заметному улучшению производительности и надежности этих устройств по сравнению с другими мемристорами на основе парилена. Исследованные мемристоры показали более низкое напряжение переключения, меньшую дисперсию характеристик и повышенную пластичность при энергопотреблении на уровне 30 пДж. Используя



комплексный статистический анализ, мы определили оптимальные параметры синтеза, которые способствуют повышению производительности устройства. Предложен механизм резистивного переключения, в первую очередь связанный с движением ионов меди внутри слоя нанокompозита. Показана возможность использования данных мемристоров в НС для решения задачи классификации рукописных цифр из базы данных MNIST. Изучена возможность квантизации весов (от 1 до 5 бит) для данной НС. Показано, что использование квантизации весов на уровне 3 бит и выше практически не приводит к уменьшению точности классификации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект 24-19-00200).*

Литература

1. Wan W., Kubendran R., Schaefer C. et al. // *Nature*, 2022. 608, 504.
2. Iliasov A. I., Matsukatova A. N., Emelyanov A. V. et al. // *Nanoscale Horizons*, 2024. 9, 238.
3. Martyshev M. N., Emelyanov A. V., Demin V. A. et al. // *Phys. Rev. Appl.*, 2020. 14, 034016.
4. Minnekhanov A. A., Emelyanov A. V., Lapkin D. A. et al. // *Sci. Rep.*, 2019. 9, 10800.
5. Minnekhanov A. A., Shvetsov B. S., Emelyanov A. V. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2021. 54.
6. Kim J. E., Kim B., Kwon H. T. et al. // *IEEE Access*, 2022. 10, 109760.
7. Chen Q., Lin M., Wang Z. et al. *Adv. Electron. Mater.*, 2019. 5, 1800852.
8. Matsukatova A. N., Vdovichenko A. Y., Patsaev T. D. et al. // *Nano Res.*, 2023. 16, 3207.
9. Minnekhanov A., Matsukatova A., Trofimov A. et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023. 15, 54996.

УДК 621.382

Мемристоры на основе антисегнетоэлектрических туннельных переходов

Ханас А. Р., Сизых Н. А., Жидков Н. С., Зенкевич А. В.

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
khanas@phystech.edu

Рассматриваются принципы создания мемристоров на основе антисегнетоэлектрических туннельных переходов.

Ключевые слова: мемристоры; антисегнетоэлектрики; туннельные переходы.

Одним из важных направлений развития современной микроэлектроники является разработка компонентной базы для аппаратной реализации искусственных нейронных сетей. Важнейшим элементом в данной сфере является мемристор (от англ., memory + resistor = резистор с памятью) — двухполюсное устройство, значение сопротивления которого может изменяться при электрическом воздействии и сохраняться в течение некоторого времени. Было обнаружено, что мемристоры являются электронными аналогами биологических синапсов — соединений между нейронами, ответственными за процессы обучения и память посредством модуляции электрохимической проводимости. Реализация электронных синапсов является одним из важнейших вопросов разработки нейроморфной ЭКБ, однако для реализации наиболее продвинутых алгоритмов спайковых нейронных сетей требуется также реализация электронных искусственных нейронов (нейристоров). Ключевым компонентом для создания нейристоров в большинстве электронных моделей нейрона является пороговый переключатель, при помощи которого реализуется механизм порогового срабатывания и генерации спайка (нервного импульса). Оказалось, что в качестве пороговых переключателей могут быть использованы мемристоры с краткосрочной памятью и широким окном памяти (желательно, от нескольких порядков).

В данном докладе рассматривается вопрос реализации мемристоров на основе антисегнетоэлектрических туннельных переходов. Принцип работы таких устройств состоит в модуляции проницаемости барьера структуры металл-диэлектрик-металл поляризацией диэлектрика. При использовании в качестве диэлектрика сегнетоэлектрического материала, поляризация будет сохраняться после отключения внешнего напряжения — таким способом можно реализовать синаптический мемристор. Если используется антисегнетоэлектрический материал, в состояниях с скомпенсированной (равной нулю) и нескомпенсированной поляризацией проницаемость барьера может изменяться очень существенно, однако при отключенном внешнем воздействии устойчивым является только скомпенсированное состояние — т. е., реализуется функционале порогового переключателя (или мемристора с краткосрочной памятью). Данные реализации рассматриваются на примере смешанных оксидов $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$.



УДК 53.097

Дробно-дифференциальный пороговый интегратор с утечкой и его нейроморфная реализация

Сибтов Р. Т.^{1,2}, Гаврилова А. К.^{1,2}, Савицкий А. И.^{1,2}

¹ НПК «Технологический центр»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

Институт интегральной электроники

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Исследуется динамика дробно-дифференциального порогового интегратора с утечкой (ПИУ) для импульсных нейроморфных сетей. Управляющее уравнение релаксации содержит дробную производную порядка $0 < \alpha < 1$. Присущий степенной характер релаксационного процесса позволяет эффективно эмулировать феномен долговременной потенциации, что является критически важным для регистрации и обработки мерцающих (масштабно-инвариантных во времени) сигналов. Были проведены оценки статистических характеристик отклика дробно-дифференциального ПИУ на мерцающий входной поток импульсов напряжения, сгенерированный с использованием дробного пуассоновского процесса порядка $\nu < 1$. Показано, что исследуемые ячейки могут быть интегрированы в крупномасштабную схему для параллельной обработки сигналов и функций обучения немарковской сети. В качестве нейроморфной реализации дробного ПИУ изучается оптоэлектронный мемристор, созданный на основе нанокompозитной пленки Ag-TiO_2 . Была продемонстрирована возможность описания светоиндуцированной синаптической пластичности (включая потенциацию и депрессию) при воздействии видимого и ультрафиолетового света с помощью решения дробного уравнения релаксации, которое служит основой для дробной версии ПИУ.

Ключевые слова: импульсная нейроморфная сеть; недебаевская релаксация; дробная производная; оптоэлектронный мемристор.

Пороговый интегратор с утечкой (ПИУ) представляет собой популярную математическую модель, описывающую активность нейрона [1]. В рамках данной модели предполагается, что мембранный потенциал ведет себя аналогично напряжению в RC-цепи, где конденсатор моделирует накопление потенциала, а сопротивление — его утечку. При достижении мембранным потенциалом определенного порога происходит генерация всплеска (спайка), после чего потенциал сбрасывается до уровня покоя и цикл начинается заново. Модель ПИУ широко используется в вычислительной нейробиологии для анализа динамики импульсных нейронных сетей [1–3]. Кинетические модели, основанные на уравнениях с дробными производными, могут адекватно описывать нелокальные во времени процессы [4, 5], что позволяет рассматривать их в качестве полезного инструмента для описания нейронной памяти [2]. В статье [2] предложено обобщение модели ПИУ на основе уравнения релаксации (утечки) с дробной производной Герасимова — Капуто порядка $0 < \alpha < 1$. Эта обобщенная модель демонстрирует успешные прогнозы адаптации импульсов в пирамидальных клетках неокортекса и тектальных нейронах *in vitro* [3]. Эта модель способна генерировать всплески с задержками первого

импульса и переменными интервалами между последующими сигналами со степенным распределением интервалов между спайками. В нашем исследовании продемонстрировано, что характеристики долговременной потенциации, связанной с степенной релаксацией в асимптотическом режиме, позволяют применять дробно-дифференциальный ПИУ для обработки мерцающих сигналов, обладающих временной масштабной инвариантностью. В данной работе также рассмотрены статистические свойства отклика интегратора на мерцающий входной ряд импульсов напряжения, описываемый совокупностью дробных пуассоновских процессов. Установлено, что дробно-дифференциальный ПИУ более эффективен при обработке мерцающих сигналов по сравнению со стандартной версией ПИУ.

В качестве нейроморфной реализации дробного ПИУ исследуется оптоэлектронный мемристор, на основе нанокompозитной пленки Ag-TiO_2 . Показано, что светоиндуцированная синаптическая пластичность (например, потенцияция и депрессия) при видимой и ультрафиолетовой световой стимуляции, описывается решением дробного уравнения релаксации лежащего в основе дробной версии ПИУ. В статье [6] демонстрируется, что подобная система способна функционально сочетать визуальное восприятие и низкоуровневую предварительную обработку изображений (включая усиление контрастности и шумоподавление) в одном устройстве.

Работа частично выполнена в рамках реализации программы развития НИУ МИЭТ «Приоритет — 2030» национального проекта «Наука и университеты».

Литература

1. Gerstner W., Kistler W. M., Naud R., Paninski L. *Neuronal Dynamics*. Cambridge, 2014.
2. Teka W. W., Upadhyay R. K., Mondal A. // *Neural Networks*, 2017. Vol. 93. P. 110–125.
3. Teka W., Marinov T. M., Santamaria F. // *PLoS computational biology*, 2014. Vol. 10. P. e1003526.
4. Uchaikin V. V. Sibatov R. *Fractional Kinetics in Solids* // World Scientific, 2013.
5. Сибатов Р. Т., Учайкин В. В. // *Успехи физических наук*, 2009. 179.10. 1079–1104.
6. Shan Xuanyu et al. // *Advanced Science*, 2022. P. 2104632.

УДК 004.383.8.032.26

Биполярные морфологические нейронные сети для нейроморфных вычислителей

Д. т. н. Николаев Д. П.^{1,2}, Ямаев А. В.^{1,2}, к. т. н. Лимонова Е. Е.^{1,2}¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2

d.p.nikolaev@gmail.com

² ООО «Смарт Энджинс Сервис»

117312, г. Москва, просп. 60-летия Октября, 9

Нейронные сети широко используются в практических задачах, поэтому разработка моделей, для которых возможно создание высокопроизводительных ускорителей крайне актуальна. В работе рассматривается аппаратно-ориентированная биполярная морфологическая модель сети и обсуждаются перспективы ее развития.

Ключевые слова: биполярный морфологический нейрон; нейросетевые ускорители; нейроморфные вычисления.

На сегодняшний день быстрое и энергоэффективное исполнение нейронных сетей требуется практически во всех прикладных задачах распознавания образов. Для решения этой задачи со стороны аппаратуры проектируются специализированные нейроускорители, такие как Intel Movidius, Google Tensor Processing Unit и др. Специалисты в области искусственного интеллекта применяют различные подходы для упрощения вычислений в нейронных сетях:

- сокращение числа коэффициентов, то есть использование компактных нейросетевых моделей и/или уменьшение размеров, существующих (т. н. pruning),
- использование различных методов декомпозиции вычислений, которые позволяют уменьшить число арифметических операций в сети,
- использование квантования, при котором данные и вычисления в сети выполняются в целых числах малых разрядностей.

Однако ни один из этих подходов не удовлетворяет растущего запроса на высокоэффективное исполнение нейросетевых моделей, что привело к созданию аппаратно-ориентированных моделей нейронных сетей, позволяющих более вычислительно- и энергоэффективную реализацию, чем классические модели. Например, в 2019 году была предложена биполярная морфологическая (БМ) модель нейрона [1], которая использует операции идемпотентного полукольца (сложение и взятия максимума) вместо операций умножения и сложения в классической модели. Входные и выходные значения слоя подвергаются операциям логарифмирования и потенцирования в дополнение к нелинейной функции активации. Для обработки отрицательных значений входов и весов строятся четыре вычислительных «ветки», как показано на рис. 1.

Аппаратная реализация такой модели основана на модулях вычисления максимума сумм в отличие от классического устройства для вычисления суммы произведений (FMA). Для вещественных чисел латентность FMA составила 4 такта, а для БМ-сумматора — 3 такта, причем он потребовал втрое меньше аппаратных ресурсов [2]. Кроме того, для БМ сетей был предложен метод квантования [3], который может дополнительно упростить реализацию.

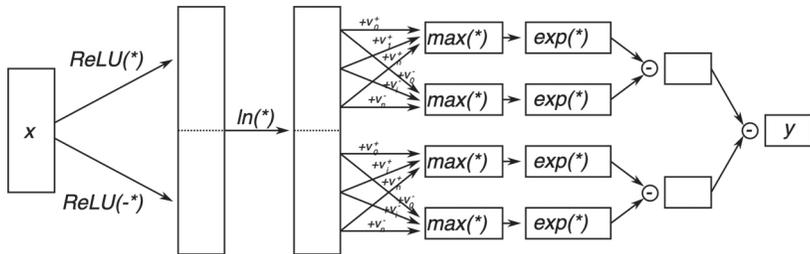


Рис. 1. Схема биполярного морфологического нейрона или слоя

Позднее БМ модель была доработана так, чтобы использовать лишь один вычислительный путь:

$$f(\bar{x}) = \phi \left\{ \exp \max_{i=1}^n \left[\ln(x_i + \Delta x_i) + \ln(\omega_i + \Delta \omega_i) \right] - \Delta x_i \omega_i - \Delta \omega_i x_i - \Delta x_i \Delta \omega_i \right\},$$

где ω — вектор весов, x — вектор входных данных, ϕ — функция, а Δx и $\Delta \omega$ — постоянные смещения весов и входных данных соответственно. Такую модель авторы назвали 1,5-веточной БМ сетью и предложили методы обучения для нее на основе послонной аппроксимации и дистилляции знаний. Она позволяет значительно сократить количество вентиляй и не приводит к росту времени работы.

Таким образом, БМ сети являются перспективным направлением для дальнейших разработок:

- 1) метода квантования для 1,5-веточных БМ сетей;
- 2) метода обучения квантованных 1,5-веточных БМ сетей;
- 3) проектирования нейроморфного ускорителя на основе квантованных 1,5-веточных БМ сетей.

*Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке
Российского научного фонда (проект номер 23-21-00524).*

Литература

1. Limonova E., Matveev D., Nikolaev D., Arlazarov V.V. Bipolar morphological neural networks: convolution without multiplication // Proceedings SPIE. The 12th International Conference on Machine Vision (ICMV 2019), 2020. Vol. 11433. P. 114333J1-114333J8. DOI: 10.1117/12.2559299.
2. Tsoy M.O., Alfonso D.M., Limonova E.E. Hardware Implementation of Classical and Bipolar Morphological Models for Convolutional Neural Network // En&T-2021. Washington, DC, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Computer Society, 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681765.
3. Limonova E., Zingerenko M., Nikolaev D., Arlazarov V.V. Quantization Method for Bipolar Morphological Neural Networks // Proceedings SPIE. The 16th International Conference on Machine Vision (ICMV 2023), 2024. Vol. 13072. P. 1307204–1-1307204-8. DOI: 10.1117/12.3023272.
4. Зингеренко М. В., Лимонова Е. Е. Послойная дистилляция знаний для обучения упрощенных биполярных морфологических нейронных сетей // ИТВС, 2023. — № 3. — С. 46–54. DOI: 10.14357/20718632230305.



УДК 681.51

Машинное обучение с аппроксимацией решений на основе дифференциально алгебраических уравнений

Горобцов А. С.^{1,2}

¹ *Волгоградский Государственный Технический Университет
400005, г. Волгоград, просп. Ленина, 28
vm@vstu.ru*

² *ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН
101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4
info@imash.ru*

Рассматриваются методы машинного обучения с использованием математической модели объекта в форме дифференциально — алгебраических уравнений. Уравнения такого типа описывают, например, управляемое движение многомерных робототехнических систем, в частности, антропоморфных и зооморфных роботов, задача управления которыми актуальна. Машинное обучение, сводится к задаче параметрической оптимизации в пространстве параметров вырожденной системы линейных алгебраических уравнений. Приведены примеры для синтеза управляемого движения для двуногих и четырехногих роботов.

Ключевые слова: машинное обучение; оптимальное управление; робототехника; шагающие роботы; экзоскелетоны.

В машинном обучении задачи оптимального управления занимают существенное место и остаются актуальными, в частности, в области управления роботами со сложной локомоцией. В [1, 2] представлен метод обобщенной задачи динамического уравнивания для систем, динамика которых описывается нелинейными дифференциально — алгебраическими уравнениями. Метод позволяет находить функции управления в форме множителей Лагранжа как функций времени. Случаи, в которых задача имеет однозначное решение представлены в [2]. Наибольший интерес представляют системы, для которых матрица системы вырождена и однозначного решения не существует. Допустимое решение в этом случае может быть представлено в форме задачи параметрической оптимизации (машинного обучения) в пространстве параметров, через которые выражается решение вырожденной системы линейных алгебраических уравнений. Преимущество такого подхода — значительное сокращение размерности пространства параметров задачи, за счет сложение интерполяционной модели.

В качестве примеров рассмотрено управление четырехногим роботом — роботом собакой. Избыточность такой системы для пространственного движения корпуса, трехмерных реакций в опорах стоп и трех приводах на ногу равна 12. В качестве критерия оптимизации использовалась взвешенная сумма квадратов усилий в приводах ног. Пример управляемого движения робота собаки — отработка возмущающего бокового импульса x [3] показан на рис. 1. Примеры с роботом андроидом можно найти в [4]



Рис. 1. Фрагмент управляемого движения робота собаки — реакция на боковое возмущение

Литература

1. Gorobtsov A., Sychev O., Orlova Yu., Smirnov E. Grigoreva O. Bochkin A., Andreeva M. Optimal Greedy Control in Reinforcement Learning // *Sensors*, 2022. Vol. 22. Issue 22. Article 8920. 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228920>.
2. Горобцов А. С. Обобщенная задача динамического уравнивания и перспективные направления ее применения // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023. — № 3 (756). — С. 14–24. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-3-14-24.
3. Горобцов А. С., Рыжов Е. Н., Чигиринская Н. В., Чесноков О. К. Управление движением робота-собаки методом обратной задачи // *Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы*, 2024. — № 4 (287). — С. 49–54. DOI: 10.35211/1990-5297-2024-4-287-49-54.
4. Горобцов А. С., Рыжов Е. Н., Тарасов П. С. Управление локомоцией робота-андроида методом обобщенной задачи динамического уравнивания в невырожденном случае // *Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы*, 2024. — № 4 (287). — С. 44–49. DOI: 10.35211/1990-5297-2024-4-287-44-49.

УДК 004.383.8.032.26

Автоматизированное проектирование нейроморфной архитектуры на базе аппаратно-функциональных блоков

Петров М. О., Рындин Е. А., Андреева Н. В.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф

petrovmo94@yandex.ru, ryndinator@gmail.com, nvandr@gmail.com

Разработан метод и программное обеспечение автоматизированного проектирования нейронных сетей архитектуры ResNet с аппаратной реализацией обучения на базе пяти аналоговых библиотечных элементов. Приведены схемы предложенных библиотечных элементов и результаты схемотехнического моделирования.

Ключевые слова: глубокая нейронная сеть; архитектура ResNet; система автоматизированного проектирования; интегральные КМОП-элементы.

В настоящее время нейронные сети на основе архитектуры ResNet являются одними из наиболее востребованных при решении широкого круга задач. Однако их программная реализация на компьютерах с фон-неймановской архитектурой становится неэффективной при работе с большими асинхронными потоками данных и требует повышенного энергопотребления. Переход к аппаратному исполнению алгоритмов ResNet может в значительной степени решить данную проблему при условии интегральной реализации в рамках асинхронной аналоговой схемотехники как функциональных блоков, работающих в инференс-режиме, так и блоков, реализующих обучение сети. Для решения этой задачи при выполнении данного исследования разработан компилятор, позволяющий с использованием аналоговых библиотечных элементов синтезировать функциональную схему на основе графа нейронной сети с обучением методом обратного распространения ошибки (рис. 1).

Из перечисленных на рис. 1 библиотечных элементов основным является синаптический элемент (*SE*), позволяющий реализовать функциональные блоки матрично-векторного умножения, являющиеся базовыми для нейронных сетей. Схема, топология и результаты моделирования разработанного синаптического элемента приведены на рис. 2–4.

Топология элемента (рис. 3) разработана для КМОП-технологии с проектной нормой 50 нм. В соответствии с результатами схемотехнического моделирования, выходной ток I_{OUT} элемента (нижняя диаграмма на рис. 4) равен произведению уровня входного аналогового сигнала S_{IN} на двоичный цифровой код $S5 - S0$ синаптического веса (проводимости), причем, как видно из схемы элемента на рис. 2, произведение аналогового уровня на цифровой вес выполняется без использования АЦП и ЦАП, обеспечивая уменьшение занимаемой на кристалле площади и повышение энергоэффективности. Соединение синаптических элементов *SE* для реализации функционального блока матрично-векторного умножения показано на рис. 5. Разработанное программное обеспечение позволяет автоматически масштабировать матрично-векторный множитель под конфигурацию соответствующего слоя нейронной сети, а настройка синаптических весов в процессе обучения

осуществляется с помощью регистров (DD2 на рис. 2) по цифровым шинам W_M управляющими импульсами двухкоординатной выборки WR_x, WR_y

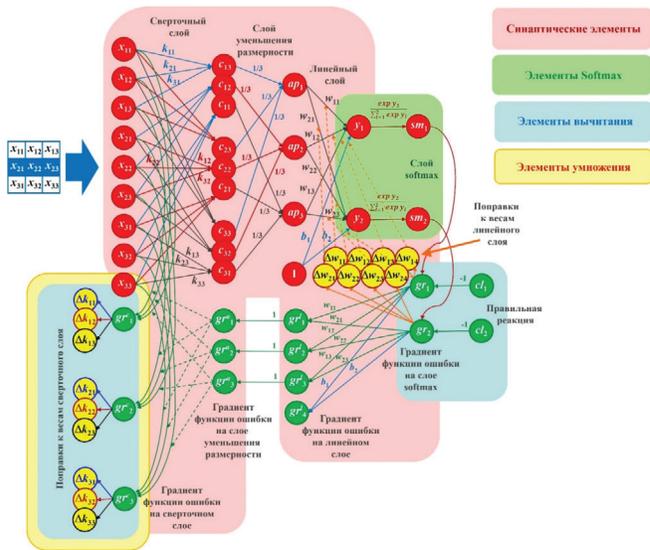


Рис. 1. Граф сверточной нейронной сети и перечень библиотечных элементов для ее аппаратной реализации

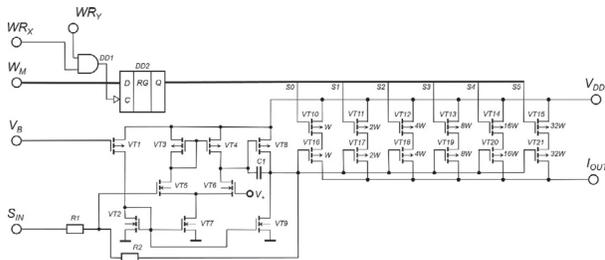


Рис. 2. Схема синаптического элемента SE

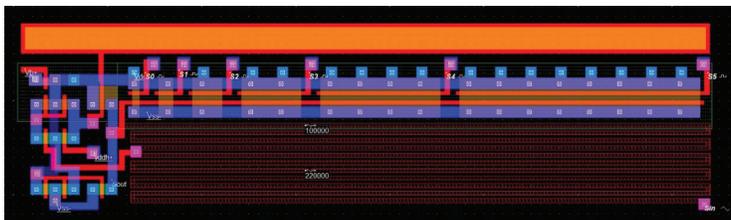


Рис. 3. Топология синаптического элемента (без элементов $DD1, DD2$) для технологии КМОП-50 нм (размеры на кристалле $9,1 \times 2,5$ мкм)

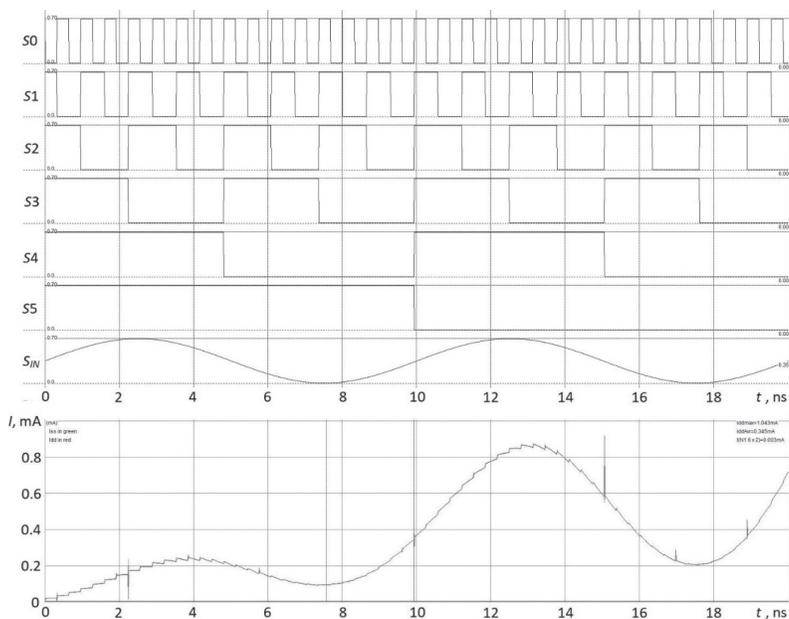


Рис. 4. Результаты моделирования синаптического элемента для напряжения питания $V_{DD} = 0,7$ В

На рис. 6 приведена схема элемента Softmax, осуществляющего перевод результатов классификации в вероятностное распределение с использованием выражения (1) (обозначения в (1) соответствуют рис. 1):

$$sm_l = \frac{\exp y_l}{\sum_{i=1}^2 \exp y_i}. \tag{1}$$

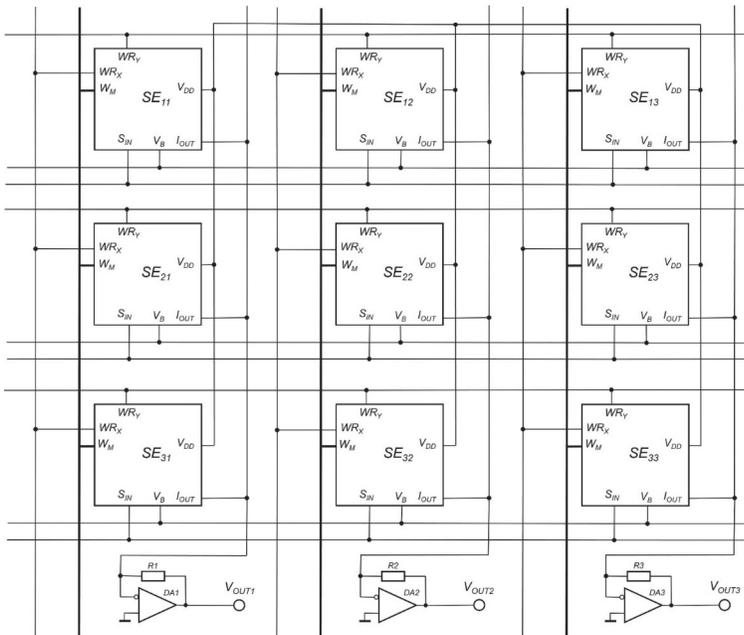


Рис. 5. Схема функционального блока матрично-векторного умножения

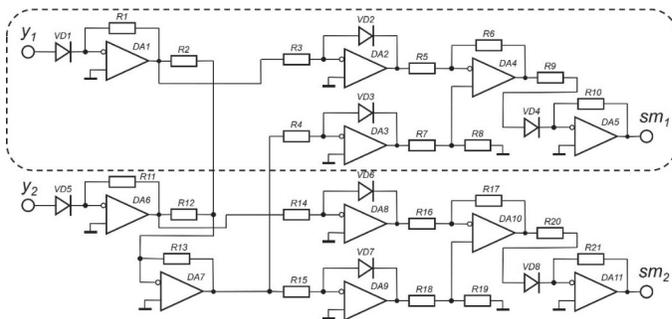


Рис. 6. Схема элемента Softmax

Схема элемента вычитания, используемого для вычисления градиента функции ошибки на слое Softmax (gr_i) и поправок к весам сверточного слоя (Δk_{ij}), приведена на рис. 7.

При вычислении поправок Δk_{ij} к весам сверточного слоя используется также элемент умножения градиентов функции ошибки на сверточном слое на константу обучения α , схема которого показана на рис. 8.

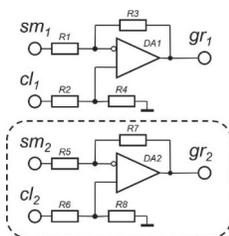


Рис. 7. Схема элемента вычитания

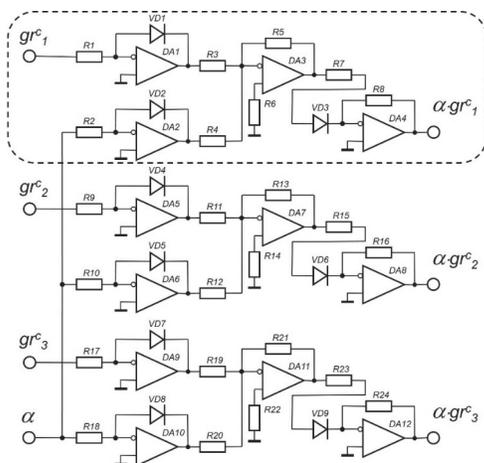


Рис. 8. Схема элемента умножения

Все приведенные библиотечные элементы масштабируются разработанным компилятором в соответствии с конфигурацией слоев проектируемой нейронной сети посредством изменения числа функциональных блоков, выделенных на рис. 6–8 пунктирными линиями.

Дополнительным библиотечным элементом является элемент нормирования, схема которого приведена на рис. 9. Он используется для приведения результатов вычислений всех слоев нейронной сети к рабочему диапазону, определяемому напряжением питания.

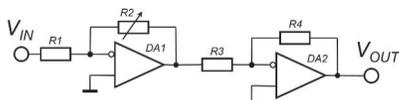


Рис. 9. Схема элемента нормирования

УДК 621.382; 004.383.8.032.6; 519.6;

Энергоэффективный и масштабируемый маршрутизатор нейронных импульсов**Писарев А. Д., Бусыгин А. Н., Удовиченко С. Ю.***Тюменский государственный университет**625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6**spcb.doc@gmail.com*

На основе мемристорно-диодного кроссбара разработано матричное программируемое логическое устройство, обрабатывающее информацию посредством маршрутизации импульсов в биоморфном нейропроцессоре. Представлена периферийная электрическая схема, обеспечивающая ввод цифровых переменных, вывод результата в цифровом виде, а также контроль состояний отдельных мемристоров.

Ключевые слова: биоморфный нейропроцессор; искусственный интеллект; мемристор; мемристорно-диодный кроссбар; импульсные нейронные сети.

В аппаратной цифровой реализации классической нейросети потребление энергии происходит постоянно, так как требуется расчет всех нейронов независимо от их состояния. Импульсные нейронные сети превосходят нейросети на импульсных нейронах в точности и вычислительной мощности и импульсный подход лучше приспособлен для аппаратной реализации [1]. Кроме этого, аппаратные импульсные нейросети являются более энергоэффективными, поскольку основное потребление энергии в них происходит при активации нейронов. В работе [2] представлена концепция биоморфного нейропроцессора, реализующего аппаратную импульсную нейросеть, предназначенную для решения как типовых задач обработки информации с помощью информационных нейросетей, так и для моделирования биоморфных нейросетей путем воспроизведения больших сетевых архитектур, в том числе, работы кортикальной колонки мозга человека. По мнению авторов настоящей статьи большие биоморфные нейросети способны выйти на уровень реализации сильного искусственного интеллекта, и для достижения этой цели требуется проектирование энергоэффективных и масштабируемых аппаратных блоков нейропроцессора.

Основными блоками нейропроцессора [2], разработанного на основе нового компонента нанoeлектроники мемристорно-диодного кроссбара, являются запоминающая матрица, блок нейронов и маршрутизатор нейронных импульсов, а также входное и выходное устройства, согласующие цифровой и импульсный формат кодирования данных. Запоминающая матрица представляется собой массив искусственных синапсов на основе комплементарных мемристорных схем. Из-за ограниченного размера запоминающей матрицы один нейрон имеет ограниченный набор входных синапсов. Для обеспечения возможности связи нейронов между собой и формирования в динамике нейросетевых архитектур требуется промежуточная маршрутизация импульсов биоморфного типа. Поскольку импульсы нейронов всегда одинаковой амплитуды и ширины, маршрутизация может быть выполнена программируемой логической матрицей на основе мемристорно-диодного кроссбара [2].

Функциональную схему маршрутизатора нейронных импульсов можно представить в виде блоков: мемристорно-диодный кроссбар, массив КМОП инверторов, драйверы строк и столбцов матрицы, демультимплексор и мультиплексор входных и выходных импульсов (рис. 1).

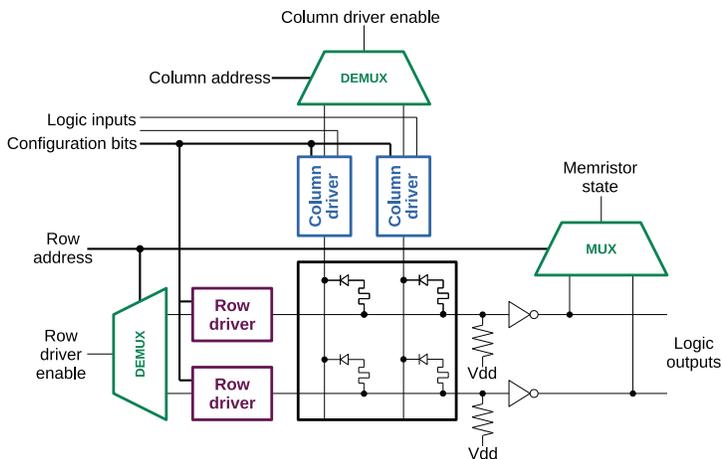


Рис. 1. Функциональная схема маршрутизатора нейронных импульсов

Логические вентили в кроссбаре представляют собой пропорциональную логику на биполярных мемристорах с диодами. Диоды используются в качестве селекторов сигналов и для реализации резисторно-диодной логики. Мемристорно-диодные ячейки и подтягивающий резистор образуют делитель напряжения, выход которого подключен к КМОП инвертору. Таким образом, при использовании подтяжки к высокому логическому уровню в кроссбаре реализуется набор логических вентилей NAND.

Коммутация столбцов и строк кроссбара с источниками напряжения осуществляется с помощью специальных драйверов с цифровым управлением. Активация нужных драйверов производится путем передачи разрешающего цифрового сигнала через демультимплексоры. Считывание состояния мемристора в NAND вентиле осуществляется подачей напряжения логической единицы на вход нужного мемристора и напряжений логического нуля на остальные входы вентилей. Вывод результата считывания осуществляется через вспомогательный мультиплексор.

Путем численного моделирования с использованием экспериментальных вольт-амперных характеристик многофиламентного мемристора, опубликованных в работе [3], был оценен максимальный размер мемристорно-диодного кроссбара для работоспособного маршрутизатора на основе анализа деградации напряжений логических уровней, обусловленной паразитными токами в кроссбаре и периферии. При использовании транзисторов с техпроцессом 250 нм маршрутизатор работоспособен до 14×14 . Показано, что путем увеличения проводимости транзисторных ключей в 10 раз, например, с помощью параллельного включения транзисторов можно увеличить размер кроссбара до 40×40 .

Работоспособность периферийных схем в составе полной электрической схемы логического устройства маршрутизатора нейронных импульсов была проверена при моделировании процессов записи и считывания отдельных мемристоров в кроссбаре размером 8×8 ячеек. В одной непрерывной симуляции были проведены успешные считывание, запись и снова считывание одного мемристора. Функциональность ввода и вывода информации в цифровой форме, а также выполнения над ней логических операций, была проверена в ходе моделирования задачи маршрутизации импульсов.

Таким образом, предложенное логическое устройство маршрутизатора нейронных импульсов может работать самостоятельно и заменить программируемые логические устройства, использующие транзисторы с плавающим затвором в нейроморфной электронике для хранения конфигурации нейронных связей.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет 2030».

Литература

1. Zahedi M., Lebdeh M.A., Bengel C., Wouters D., Menzel S., Le Gallo M., Sebastian A., Wong S., Hamdioui S. MNEMOSENE: Tile Architecture and Simulator for Memristor-based Computation-in-memory // ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC), 2022. Vol. 18 (3). P. 1–24.
2. Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Yu., Maevsky O. V. The biomorphic neuromorphic processor based on the composite memristor — diode crossbar // Microelectronic journal, 2020. Art.104827.
3. Nikiruy K. E., Emelyanov A. V., Demin V. A., Sitnikov A. V., Minnekhanov A. A., Rylkov V. V., Kashkarov P. K., Kovalchuk M. V. Dopamine-like STDP modulation in nanocomposite memristors // AIP Advances, 2019. Vol. 9. Art.065116.



УДК 004.93; 548

Применение моделей детекции и сегментации для решения задач материаловедения

Вербицкий Р. А.¹, Ананьев М. В.¹, д. х. н., Сыров Ю. В.¹, к. ф.-м. н.,
Латонов В. Д.^{1,2}, Денисова Д. В.^{1,2}, Никифорова В. В.^{1,2}, Паламарчук Я. В.^{1,2},
Лебедев А. С.^{1,2}, Куличенко А. Д.^{1,2}

¹ АО «Гиредмет» имени Н. П. Сажина
111524, г. Москва, ул. Электродная, 2, стр. 1
RAVerbitsky@rosatom.ru

² МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

В работе продемонстрировано применение машинного зрения в технологии производства полупроводниковых соединений. На примере автоматизации процесса технологического контроля пластин арсенида галлия с целью оценки плотности дислокаций, была решена задача детекции ямок травления при помощи открытой модели YOLOv8. Решение задачи сегментации приводится на примере выявления результатов термической обработки термоэлектриков различных составов — с помощью сегментирующей модели FastSAM анализируется морфология частиц.

Ключевые слова: нейронная сеть; машинное зрение; арсенид галлия; плотность дислокаций; термоэлектрики; YOLO; FasSAM.

Технологии искусственного интеллекта и машинного обучения повсеместно внедряются в различные сферы жизнедеятельности человека: от традиционных и общедоступных решений по распознаванию и генерации графических изображений; текстовых документов и живой речи человека; до создания узкоспециализированных программных комплексов; позволяющих осуществить стыковку космического аппарата к станции «МКС» [1]. В настоящей работе продемонстрированы решения на основе машинного зрения в срезе задач технологии материаловедения.

Известно, что контроль результатов многих процессов в материаловедении осуществляется при помощи микроскопии. Так, например, контроль плотности дислокаций, образующихся в процессе роста монокристалла арсенида галлия, осуществляется выявлением дислокационных ямок травления проявляемых в результате селективного травления пластин GaAs (рис. 1) и их визуальным подсчетом при помощи оптического микроскопа [2]. При плотности дислокационных ямок травления (EPD — etch pit density, $[см^{-2}]$) около $EPD = 5 \cdot 10^4 см^{-2}$ и диаметре пластины 50 мм, абсолютное количество ямок достигает одного миллиона. Таким образом, для осуществления оперативного технологического контроля, для оценки величины EPD применяются усредняющие методики подсчета по характерным полям зрения [3], дающие результат с ошибкой 40–50% и не позволяющие получить статистически значимые данные.

Для увеличения точности оценки величины EPD , получения статистических данных, данных по распределению — необходим сплошной подсчет количества ямок травления, и эту задачу возможно решить только, автоматизировав процесс подсчета. Один из способов автоматизации — применение технологий машинного

зрения с дальнейшей программной обработкой полученных данных и вывод результата в удобном виде.

Для решения данной задачи, авторами настоящей статьи была использована открытая для некоммерческого использования модель детекции YOLOv8 [3]. Пример результата детекции объектов также представлен на рис. 1.

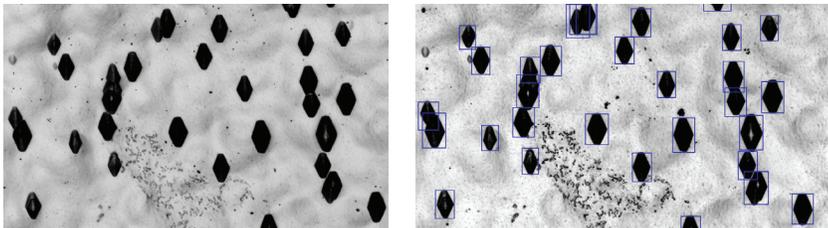


Рис. 1. Участок пластины GaAs с ямками травления до обработки нейронной сетью (слева) и после обработки нейронной сетью (справа)

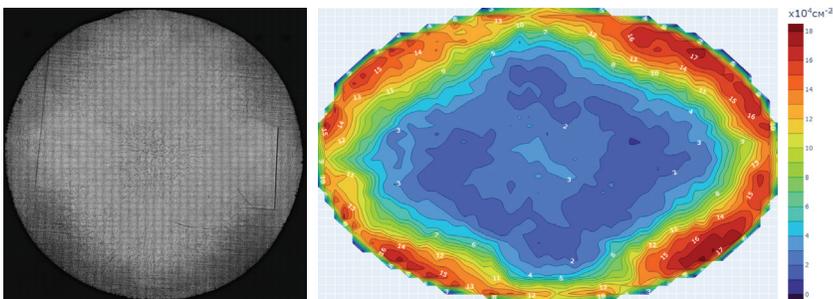


Рис. 2. Панорама пластины (слева) и распределение плотности дислокаций на ней (справа) после изотермического отжига

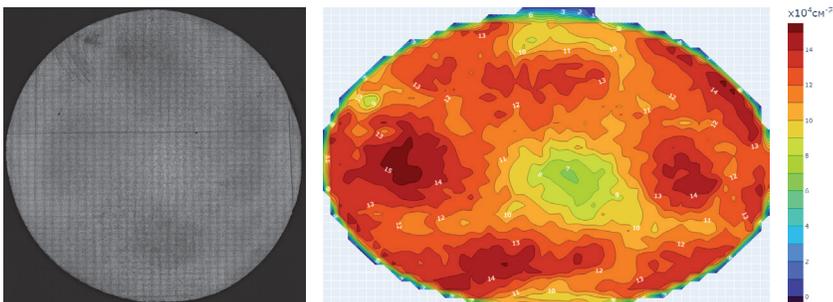


Рис. 3. Панорама пластины (слева) и распределение плотности дислокаций на ней (справа) после динамического градиентного отжига



Пост-обработка данных по результатам детекции проводилась в программном пакете АСПД «Колибри» [4]. Наглядная инфографика позволяет оценить изменения, произошедшие в кристалле после изменений условий его роста или пост-ростовой обработки. На рис. 2 изображена панорама контрольной пластины и распределение плотности дислокаций после изотермического отжига монокристалла. На рис. 3 изображена панорама пластины и распределение плотности дислокаций после динамического градиентного отжига того же монокристалла GaAs.

Решение задачи сегментации актуально в технологии производства материалов для создания среднетемпературных твердооксидных топливных элементов [5] — для оценки морфологии близких по геометрии частиц и оценки характеристик, влияющих на свойства данных материалов. В частности, авторами настоящей работы была применена сегментирующая модель FastSAM [6] и обучены два классификатора VGG16 для выявления заданных признаков изображений. Исходное изображение и результаты разметки представлены на рис. 4. После разметки изображений возможно определение почти любых метрик, определяющих характеристики материала.

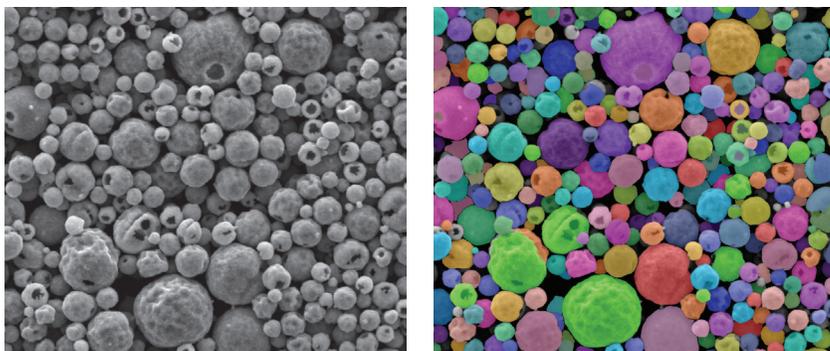


Рис. 4. Исходное изображение (слева) и результат разметки сегментирующей модели FastSAM (справа)

Результаты проведенной работы показали эффективность применения технологий машинного зрения для детекции и сегментации объектов; в получении новых, статистически значимых данных о структуре исследуемого материала.

Литература

1. Власов С. О., Гладышев А. И., Богуславский А. А., Соколов С. М. Решение задачи обнаружения объекта с помощью нейросетевых технологий // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2023. — № 16. — С. 1–27. DOI: 10.20948/prepr-2023-16. EDN FMRXTH.
2. Князев С. Н., Кудря А. В., Комаровский Н. Ю. и др. Методы исследования дислокационной структуры полупроводниковых монокристаллов группы $A^{II}-B^V$ // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 2022. — Т. 25. — № 4. — С. 323–336. DOI: 10.17073/1609-3577-2022-4-323-336. EDN TEZNPS.

3. Вербицкий Р.А., Латонов В.Д., Сыров Ю.В. Техническая реализация автоматизированной системы подсчета дислокаций «Колибри» // 3-я Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», посвященная памяти академика Н.П. Сажина (РедМет-2024): Сборник тезисов. Москва, 3–5 апреля 2024 г. — Москва: АО «Гиредмет» им. Н.П. Сажина, 2024. — 416 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615712 Российская Федерация. Автоматизированная система подсчета дислокаций «Колибри» (АСПД «Колибри»): № 2024613592: заявл. 21.02.2024; опубл. 12.03.2024 / Вербицкий Р.А., Латонов В.Д., Сыров Ю.В., заявитель Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н.П. Сажина. EDN EUDJZE.
5. Ананьев М.В., Волков И.Н., Дыбов В.А. и др. Разработка среднетемпературных твердооксидных топливных элементов // Экологическая безопасность в газовой промышленности (ESGI-2023): Тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции и выставки, Москва, 13–15 декабря 2023 года. — Москва: Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ, 2023. — С. 51. EDN HVEXHS.
6. Xu Zhao, Wenchao Ding, Yongqi An, Yinglong Du, Tao Yu, Min Li, Ming Tang, Jinqiao Wang. Fast Segment Anything // Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV); Artificial Intelligence (cs.AI), 2023. Vol. 1. DOI: 10.48550/arXiv.2306.12156.



УДК 004.89:004.032.26:629.051

Применение нейросетевых технологий в задачах навигации

Скиба Е. С., Старовойтов Е. И.

АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

info@i-progress.tech

Для навигации внутри и снаружи помещений предлагается аппаратно-программный комплекс средств программно-аппаратной платформы системы интеллектуальной навигации с использованием технологии искусственного интеллекта. Источниками информации об окружающей обстановке являются ГНСС-приемник, инерциальные приборы, телекамеры, лидары, радиоданные (Wi-Fi, Bluetooth, UWB) и т. д.

Ключевые слова: искусственный интеллект; искусственная нейронная сеть; навигация; аппаратно-программный комплекс; транспорт; персональная навигация.

Введение

Разрабатываемый в АО «НИИМА «Прогресс» аппаратно-программный комплекс средств программно-аппаратной платформы системы интеллектуальной навигации с использованием технологии искусственного интеллекта предназначен для определения местоположения подвижных абонентов на открытой местности в условиях отсутствия сигналов ГНСС и внутри помещений, обеспечивая непрерывную (бесшовную) навигацию.

Комплекс реализует алгоритмы навигации с использованием методов искусственного интеллекта для анализа широкого набора доступных навигационных данных. Источниками информации об окружающей обстановке являются ГНСС-приемник, инерциальные приборы, телекамеры, лидары, одомер, радиоданные (Wi-Fi, Bluetooth, UWB) и др.

Комплексирование данных от нескольких датчиков позволяет получить надежное навигационное решение даже в случае отсутствия сигналов ГНСС, а применение нейросетевых технологий позволяет определить местоположение даже в сложных условиях, когда неприменимы обычные методы навигации [1–3].

Аппаратная часть

Разрабатываемый аппаратно-программный комплекс включает в себя два основных продукта.

Продукт 1 (аппаратный комплекс) состоит из мобильных терминалов и модулей формирования видеоизображений, навигационного поля радиозлучений и 3D-моделей окружающих объектов.

Продукт 2 (программный комплекс) осуществляет обработку и последующий анализ данных, полученных от аппаратного комплекса на основе технологий искусственного интеллекта.

В аппаратном комплексе используются изделия собственной разработки АО «НИИМА «Прогресс». Прием сигналов ГНСС (при их доступности) осуществляется модулем ПРО-04М, обмен данными по каналу Bluetooth выполняется с помощью модуля ПР4502. Обнаружение и слежение источниками радиоизлучения,

формирующими сплошную модель навигационного поля радиоизлучений («радиомаску») города в частотном диапазоне от 80 МГц до 6,0 ГГц, выполняет радиосканер (сканирующий радиоприемник на базе SDR-технологии).

В состав аппаратного комплекса также входит система локальной навигации на базе технологии LTE «КОНСУЛ-Р», создаваемая совместно с ООО «Райтек», в которой используется задел, полученный АО «НИИМА «Прогресс» при работе над системой локальной навигации «КОНСУЛ».

Радиосканер и система «КОНСУЛ-Р» являются самостоятельными продуктами.

В качестве вычислительных средств для обучения и исполнения моделей искусственного интеллекта используются отечественные нейропроцессорные вычислители разработки АО НТЦ «Модуль», входящие в состав абонентских терминалов, устанавливаемых на подвижном объекте, и на сервере обработки информации. На сервере размещается вычислительный модуль NM Card, а в абонентском терминале потребителя находится собственный вычислитель NM Mezzo mini.

Программная часть

Программный комплекс обеспечивает формирование на основе полученных и обработанных данных радиомаски и 3D-модели окружающего пространства, а также бесшовное позиционирование в зонах с затрудненным приемом сигналов ГНСС, внутри и вне помещений. Программный комплекс включает две составные части: на подвижном объекте (абоненте) и на сервере, формирующем BigData на основе данных, полученных от абонентов.

Для комплексирования результатов измерений, полученных разными датчиками используются сверточные нейронные сети (MobileNetv2, AlexNet, ResNet, DenseNet201), часто применяемые при распознавании сложных изображений. Одним из их преимуществ является использование меньшего количества параметров для обучения по сравнению с традиционными методами, например, методом опорных векторов (SVM). Также для обучения нет необходимости ручного извлечения признаков, т.к. небольшие ядра, из которых состоит сверточная нейронная сеть, позволяют использовать необработанные изображения.

В качестве самостоятельного продукта в программный комплекс входит телематическая платформа, предназначенная для мониторинга транспортных средств, обработки собранной информации, передачи обработанной информации конечным пользователям и информационного взаимодействия с внешними системами.

Еще один продукт – система Indoog-навигации, обеспечивающая навигацию внутри закрытых объектов, относится одновременно к аппаратному, и к программному комплексам: терминал (портативное носимое устройство) входит в состав аппаратного комплекса, а программное обеспечение относится к программному комплексу.

Эти два продукта предназначены для решения актуальных задач в сфере логистики, мониторинга производственных процессов и контроля за персоналом [4, 5].

Заключение

В ходе разработки аппаратно-программного комплекса средств программно-аппаратной платформы системы интеллектуальной навигации с использованием технологии искусственного интеллекта были созданы технические решения, которые сами являются полноценными продуктами и могут быть использованы



в логистике, сельском хозяйстве, контроле за персоналом, горной промышленно-сти и др.

Литература

1. Трефилов П. М., Романова П. А. Формирование достоверной навигационной информации в задачах ориентации и навигации автономных робототехнических устройств с использованием инфраструктуры интеллектуальной транспортной среды // Управление большими системами: сборник трудов, 2023. — № 106. — С. 71–95.
2. Кафиев И. Р., Романов П. С., Романова И. П. Методика выбора системы позиционирования интеллектуальной системой управления мобильного сельскохозяйственного робота // Вестник НГИЭИ. 2023. — № 11 (150). — С. 28–41. DOI: 10.24412/2227-9407-2023-11-28-41.
3. Ниженец Т. В., Лютов А. Г., Чернышев Н. Н. Нейросетевой подход в задаче повышения точности определения местоположения // Сборник трудов Национальной научно-практической конференции «Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты». — Москва, 2023. — С. 101–105.
4. Платонов С. А., Пластонов А. В., Постников М. Е. и др. Использование ГНСС для решения комплексных прикладных задач // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2019. — Т. 13. — № 6. — С. 10–18. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10275.
5. Хаданова С., Уфимцев А. Инновационная система мониторинга и контроля персонала и транспортных средств // Беспроводные технологии, 2020. — № 1. — С. 10–13.

УДК 004.032.26

Инференс нейронных сетей на тензорном процессоре N1M

Осипенко Г. П.*ООО «Хайтэк»**109316, г. Москва, Волгоградский просп., 43, корп. 3*

Описывается алгоритм действий, необходимый для организации инференса нейронных сетей на тензорном процессоре N1M. Рассказывается о преобразовании проприетарным компилятором нейронных сетей в формат, поддерживаемый тензорным процессором N1M. Приводятся оценки производительности при расчете стандартных искусственных нейронных сетей, параметры энергопотребления и частотные характеристики. Приводятся результаты независимого тестирования производительности микросхемы на наиболее распространенных нейронных сетях.

Ключевые слова: нейронные сети; искусственный интеллект; TensorFlow; компилятор нейронных сетей; тензорные вычисления.

Для того, чтобы запустить инференс нейронной сети на тензорном процессоре N1M, ее необходимо преобразовать в команды тензорного процессора. Компанией ООО «Хайтэк» разработан компилятор, основными задачами которого являются оптимизация нейросетей, формирование набора команд тензорного процессора, планирование очередности выполнения сформированных команд, аллокация памяти и т. д.

Вышеперечисленные преобразования позволяют инференсить нейронные сети с высокой производительностью и минимальными потерями точности.

УДК 004.032.26

Разработка двухдиапазонной умной камеры на российском процессоре СКИФ

Салмин С. А., к. т. н., Колодный С. А., к. ф.-м. н.

ООО «Макро ЕМС»

196105, г. Санкт-Петербург, ул. Свеаборгская, 12, лит. А

sales@macrogroup.ru

Разработка двухдиапазонной умной камеры, как устройства граничного интеллекта (Edge AI), содержащей два канала нейросетевой обработки изображения для видимого и теплового (8–14 мкм) диапазона на российском процессоре СКИФ.

Ключевые слова: умная камера; обработка видео в реальном времени; Edge AI; процессор СКИФ; интеллектуальные системы видео наблюдения.

На сегодняшний день одним из перспективных элементов построения систем интеллектуального видео наблюдения является умная камера с обработкой видео потоков «на борту». Такие камеры относят к классу устройств Edge AI [1]. Камеры, построенные по технологии Edge AI обладают рядом преимуществ:

- малая задержка до реакции на событие,
- возможность работы без подключения к сети передачи данных,
- существенно меньшие требования к мощности сетевого и серверного оборудования для системы видеонаблюдения,
- снижение влияния человеческого фактора оператора на принятие решения.

Одним из факторов, сдерживающих активную разработку и внедрение таких устройств в системы критической инфраструктуры видеонаблюдения являлось отсутствие Российского процессора с гетерогенной структурой, содержащем в своем составе вычислительные ядра общего назначения и специализированный ускоритель для нейросетевых алгоритмов с производительностью не менее 1 TOPs.

С появлением в 2021 опытных образцов российского процессора СКИФ от АО «НПЦ Элвис» [2] стало возможным создание таких устройств.

В докладе содержится информация о следующих аспектах разработки и тестирования опытного образца двухдиапазонной умной камеры [3]:

маркетинговое целеполагание, структура устройства, важные аспекты алгоритмики устройства, архитектура программного кода, результаты тестирования скорости обработки видеопотоков в зависимости от применяемых нейросетей и нагрузок по трансляции изображения.

Наличие двух каналов видимого и теплового (8–14 мкм) диапазонов и нейросетевой обработки потоков с них позволяет существенно расширить сферу применения устройства в части фиксации противоправных паттернов поведения, контроля состояния организма а, так же для контроля общественных и частных помещений.

Литература

1. Singh R., Gill S.S. Edge AI: a survey // Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 2023. Vol. 3. P. 71–92.

2. Процессор 1892BA018 «СКИФ». — URL: <https://support.elvees.com/docs/Microchips/SKIF> (дата обращения: 05.07.2024).
3. Патент РФ 2022122223, 16.08.2022. Салмин С. А., Велеславов Д. А. Способ идентификации паттернов объекта и устройство для его реализации // Патент России №RU2791825C1. 2023 Бюл. — № 8.



УДК 538.945

Физические основы сверхпроводниковой био-подобной нейроэлектроники

Щеголев А. Е.

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2
a.e.schegolev@pn.sinp.msu.ru*

Основной чертой современных нейроморфных систем является использование представления динамически меняющейся информации посредством импульсов тока или напряжения и обработка этой информации с помощью импульсных (спайковых) нейронных сетей. Создание и разработка концепции именно био-подобной нейроэлектроники открывает новые перспективы развития современной науки и технологии.

Ключевые слова: спайковые нейронные сети; нейроморфность; сверхпроводимость; био-подобие.

Современное развитие нейронных сетей и интеллектуальной обработки данных совместно с объединенными исследованиями в областях нейробиологии и физики привели к возникновению нейроморфных систем, основной целью которых является подражание работе человеческого мозга. Создание и развитие концепции био-подобной нейроэлектроники, в частности, на базе сверхпроводниковой технологии, позволяющей создавать устройства, которые совмещают в себе энергоэффективность с высоким быстродействием, необычайно важно как для создания действительно «умных» устройств, так и расширения знаний об устройстве человеческого мозга и его нервной системы.

В основе концепции сверхпроводниковой цифровой био-подобной нейроэлектроники лежит единение двух парадигм: это парадигма цифровой сверхпроводниковой электроники, причем важно, что речь идет именно об асинхронной цифровой электроники, и парадигма имплементации средствами сверхпроводниковой аналоговой электроники био-подобных элементов, выполняющих роль структурных элементов искусственной нервной ткани. Появлению подобного единения способствовала потребность создания особого класса искусственных нейроструктур, способных функционировать на принципах работы живых нервных тканей, но при этом имеющих возможность заменить некоторые естественные структуры био-подобными цифровыми схемами для лучшей производительности системы в целом и упрощения конструкции. Кроме того, использование цифровых элементов открывает дорогу к разработке и совершенствованию нейрокомпьютерных интерфейсов и кибергизации живых организмов.

Человеческий мозг, несмотря на миллионы лет эволюции, до сих пор не совершенен и обладает рядом «программных» дефектов (багов) и зачастую вредными встроенными программами, способных сильно изменить как психическое состояние человека, так и его поведение, или даже нанести непоправимый вред самому организму (как в случае с аутоиммунными заболеваниями). Поэтому не стоит гнаться за тем, чтобы достоверно и с максимальной точностью повторить его работу посредством искусственных элементов. При этом не стоит и недооценивать

сложность его организации и эволюционной продуманности многих процессов, в первую очередь биохимических. Также важно отметить, что человеческий мозг, да и вообще мозг живого организма не работает в синхронизации с тактовыми импульсами, как это принято в архитектуре фон Неймана. Для мозга живого организма характерна асинхронная работа, хотя и бывают ситуации синхронизации некоторых групп нейронов, что проявляется в виде соответствующих ритмов (альфа, бета и т. д.). Именно поэтому важно использовать именно асинхронную цифровую сверхпроводниковую электронику совместно с био-подобными нейроэлементами.

Основные структурные элементы таких систем — нейроны, а если точнее, то клеточные тела (cell body, СВ), которые генерируют потенциал действия (спайк напряжения) в ответ на внешнее воздействие. СВ могут работать в различных режимах в зависимости от своей настройки (постоянные параметры, такие как индуктивности и характеристики джозефсоновских переходов) и подстройки (токи смещения). Для передачи сигнала существуют джозефсоновские передающие линии, которые имитируют аксоны живых нервных клеток. За передачу сигнала от одного нейрона (клеточное тело + аксон) к другому или другим нейронам отвечает синаптическое соединение, которое средствами сверхпроводниковой джозефсоновской технологии реализуется посредством RLCJ-фильтра (RLC-фильтр, шунтированный джозефсоновским переходом). Однако данный элемент, вероятно, более рационально реализовать посредством сверхпроводниковой цифровой электроники.

Сверхпроводниковая цифровая асинхронная электроника должна взять на себя реализацию сложных межнейронных взаимодействий, поддерживать логику некоторых процессов (например, при реализации рефлекторных дуг или некоторых ассоциативных процессов) и своевременную активацию определенных нейронных цепей.

Литература

1. Schegolev A. E. et al. Bio-inspired design of superconducting spiking neuron and synapse // *Nanomaterials*, 2023. Vol. 13. № 14. P. 2101.
2. Skryabina O. V. et al. Superconducting bio-inspired Au-nanowire-based neurons // *Nanomaterials*, 2022. Vol. 12. № 10. P. 1671.



УДК 543.42.061

Применение элементов искусственного интеллекта в ИК-спектроскопии для биомедицинских приложений

Голяк И. С., Анфимов Д. Р., Фуфурин И. Л., Морозов А. Н.

МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

golyakis@bmstu.ru

Своевременная диагностика имеет критическое значение для эффективного лечения социально значимых заболеваний. Для решения данной задачи в исследовании предложен метод на основе инфракрасной лазерной спектроскопии выдыхаемого человеком воздуха. На основе метода создана экспериментальная установка в составе квантово-каскадного лазера, излучающего в импульсном режиме с пиковой мощностью до 150 мВт в спектральном диапазоне 5,3–12,8 мкм и многопроходной газовой ячейке Эрриотта с длиной оптического пути 76 м. Спектры выдыхаемого воздуха получены на экспериментальной установке от добровольцев, имеющих СД1, астму и пневмонию. Для классификации болезней добровольцев по спектрам предложен гибридный подход на основе вариационного автоэнкодера и метода опорных векторов. Результаты показывают, что предлагаемый гибридный подход превосходит другие комбинации методов машинного обучения.

Ключевые слова: анализ дыхания; глубокое обучение; ИК-спектроскопия; квантово-каскадный лазер; биомаркер.

Заболевания, имеющие значительные социальные последствия, такие как сахарный диабет 1 типа, астма и другие иммуноопосредованные состояния, наносят существенный вред обществу и государству из-за своей высокой распространенности. Эти заболевания ухудшают качество жизни людей, сокращают продолжительность жизни и препятствуют социальной адаптации, что подчеркивает необходимость ранней диагностики и своевременного лечения [1, 2]. Внутрибольничные инфекции представляют собой серьезную проблему для диагностики и лечения, особенно для пациентов в отделениях интенсивной терапии и пациентов, подключенных к аппаратам искусственной вентиляции легких. Применение диагностики летучих органических соединений (ЛОС) [3] могло бы помочь решить вопрос о своевременном назначении типоспецифической антибиотикотерапии, что представляет собой перспективное направление. Существует необходимость разработки неинвазивных методов диагностики социально значимых заболеваний, оказывающих минимальное воздействие на организм.

В исследовании рассмотрено применение методов машинного и глубоко обучения для решения задачи ранней диагностики хронических заболеваний по выдыхаемому человеком воздуху.

Для диагностики выдыхаемого человеком воздуха применялась установка в составе квантово-каскадного лазера, который излучает в импульсном режиме с пиковой мощностью до 150 мВт в спектральном диапазоне 5,3–12,8 мкм, и многопроходной газовой ячейки Эрриотта с длиной оптического пути 76 м. С помощью этой установки были получены спектры выдыхаемого воздуха в среднем ИК-диапазоне от добровольцев, включая здоровых людей, пациентов с сахарным диабетом

го типа, бронхиальной астмой и пневмонией. Проведен сравнительный анализ комбинации методов понижения размерности (PCA, LDA) совместно с методами классификации (метод опорных векторов, логистическая регрессия, случайный лес) со стороны машинного обучения и сверточных нейронных автоэнкодеров [4] со стороны методов глубокого обучения. В исследовании показано, что гибридный подход в сочетании автоэнкодеров с методом опорных векторов позволяет добиться точности классификации близкой к 100 %, и тем самым превзойти другие комбинаций методов машинного и глубокого обучения.

Литература

1. Grant T., Croce E., Matsui E. C. Asthma and the social determinants of health // *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 2022. Vol. 128. № 1. P. 5–11.
2. Uphoff E., Cabieses B., Pinart M., Valdes M. et al. A systematic review of socioeconomic position in relation to asthma and allergic diseases // *Eur. Respir. J.*, 2014. Vol. 46. № 2. P. 364–374.
3. de Lacy Costello B., Amann A., Al-Kateb H., Flynn C. et al. A review of the volatiles from the healthy human body // *J. Breath Res.*, 2014. Vol. 8. № 1. P. 014001.
4. Lim J., Seongyk R., Kim J. W., Kim W. Y. Molecular generative model based on conditional variational autoencoder for de novo molecular design // *J. Cheminform*, 2018. Vol. 10. № 1. P. 1758–2946.

УДК 004.891.3

Детекция боли на основе данных со стимулятора спинного мозга

к. ф.-м. н. Рябкин Д. И.^{1,2}, д. т. н. Герасименко А. Ю.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
ryabkindi@gmail.com*

² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский университет)*

119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

В работе описана разработка алгоритма детекции боли на основе данных со стимулятора спинного мозга на синтетических данных. Приведен алгоритм генерации набора данных. Описаны подходы и проанализированы пределы их применимости.

Ключевые слова: CNN; нейронные сети; детекция боли; стимулятор спинного мозга.

Алгоритмизированная детекция боли на основе данных со стимулятора спинного мозга является важной задачей, поскольку позволит создать новый класс устройств с автоматическим стимулированием спинного мозга в целях снижения боли и повышения качества жизни. На сегодняшний день пациенты и врачи вынуждены вручную подбирать параметры и включать стимуляторы для снижения боли. Алгоритмизированная детекция боли позволит снизить нагрузку на пациента и медицинский персонал, повысит точность и снизит вероятность ошибок.

В работе исследуется два подхода к детекции боли с помощью машинного обучения. Первый заключается в обработке первичных данных и генерации признаков. При данном подходе первичные данные приводятся к табличному виду и с ними можно работать с использованием всех классических методов машинного обучения, решающих задачи бинарной классификации. Второй подход подразумевает использование сверточных нейронных сетей. В данном случае первичные данные будут преобразовываться в двумерное изображение. Применение сверточных нейронных сетей для анализа нервных импульсов представляет собой перспективное направление и уже доказало свою эффективность.

Сбор данных для задачи детекции боли является крайне сложной задачей. В работе предлагается алгоритм генерации обучающих и тестовых данных. Алгоритм позволяет варьировать количество нейронных пучков, амплитуду, частоту и время генерации импульсов. Использование алгоритма позволит генерировать данные для широкого спектра задач: вычисление параметров стимуляции, определение уровня и источника боли.

Литература

1. Park C., Mummaneni P., Gottfried O. Which supervised machine learning algorithm can best predict achievement of minimum clinically important difference in neck pain after surgery in patients with cervical myelopathy? A QOD study // *Neurosurg Focus*, 2023. № 54 (6). P. E5.

2. Vuckovic A., Gallardo V.J.F., Jarjees M., Fraser M., Purcell M. Prediction of central neuropathic pain in spinal cord injury based on EEG classifier // *Clin Neurophysiol*, 2018. № 129 (8). P. 1605–1617.
3. Goudman L., Rigoard P., Billot M., De Smedt A., Roulaud M., Consortium D., Moens M. Spinal Cord Stimulation-Naïve Patients vs Patients With Failed Previous Experiences With Standard Spinal Cord Stimulation: Two Distinct Entities or One Population? // *Neuromodulation*, 2023. № 26 (1). P. 157–163.
4. Fasse A., Newton T., Liang L., Agbor U., Rowland C., Kuster N., Gaunt R., Pirondini E., Neufeld E. A novel CNN-based image segmentation pipeline for individualized feline spinal cord stimulation modeling // *J. Neural. Eng.*, 2024. № 21 (3).

УДК 004.032.26:629.735

Нейросетевой алгоритм и его возможная аппаратная реализация для полетного контроллера БПЛА

Тельминов О. А., к. т. н.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

otelminov@niime.ru

Предлагается нейросетевой алгоритм для обнаружения, слежения и сближения с регионом интереса на изображении с учетом показаний датчиков, подключенных к полетному контроллеру БПЛА. Приводится оценка аппаратной реализации.

Ключевые слова: БПЛА; полетный контроллер; регион интереса.

В базовый состав рассматриваемых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) входит рама, двигатели с пропеллерами и регуляторами оборотов, датчики полетного контроллера, аккумулятор. Размещение на борту видеокамеры и приемопередатчика позволяет внешнему пилоту управлять аппаратом «от первого лица» (FPV — First Person View). Ряд рутинных задач требует автоматизации, в том числе и слежение за регионом интереса (ROI — Region Of Interest) на изображении. Такой регион может быть подсвечен рамкой автоматически, исходя из возможностей алгоритма, или задан внешним пилотом самостоятельно. По команде должно выполняться либо слежение за регионом интереса с сохранением текущей позиции БПЛА и изменением его ориентации, либо сближение с регионом интереса — например, с местом посадки. Предложен нейросетевой алгоритм с указанным функционалом.

Выполнена оценка реализуемости алгоритма на традиционных [1] нейроускорителях. Дается обзор возможностей по реализации процессора с помощью методов печатной электроники, позволяющих наносить соответствующие слои на поверхность элементов корпуса из изолирующего материала.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологий и микроэлектроника. — М.: «ТЕХНОСФЕРА», 2020. — 434 с. ISBN 978-5-94836-611-1. EDN YEVRQ.

УДК 621.3.049

Условия применимости формализма К-систем и нейросетей к имитационному моделированию процессов и приборов нанoeлектроники

Матюшкин И. В. к. ф.-м. н., Тельминов О. А. к. т. н.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

imatyushkin@niime.ru

Обсуждается выбор круга задач технологии СБИС и проектирования приборных структур микро- и нанoeлектроники, для моделирования которых релевантны нейросетевые методы. Показаны примеры применения К-систем, в частности, для сенсора УФ-излучения на основе матрицы наностержней.

Ключевые слова: ИНС; коннекционизм; моделирование.

До сих пор применение нейросетевых моделей в проектировании отдельных приборных структур, например, мемристоров, а также технологических процессов микро- и нанoeлектроники, например, фотолитографии, основано на концепции «серого ящика». Этот подход предполагает сложную связь между приборно-технологическими параметрами прибора и его целевыми поведенческими характеристиками, причем сложность этой связи делает прямое, имитационное или аналитическое, моделирование малоэффективным. Оно может быть использовано для создания обучающей выборки для ИНС. Другой подход реализует парадигму цифровых двойников СБИС и связан с идеей ак. А.Л. Стемповского формализовать с помощью клеточного автомата материальную связь между нанooбъемами вещества в составе СБИС.

Тема доклада инициирована задачей имитационного моделирования датчика УФ-излучения на основе матрицы наностержней ZnO. Язык К-систем поддерживает идеологию многомасштабного моделирования. При этом функция перехода агрегирует транспортные процессы (диффузия и дрейф, как ионов, так и носителей заряда) и структурные превращения внутри элемента К-системы.

Релевантные примеры задач. Рост шероховатостей на поверхности микроструктуры при газофазном осаждении или жидкостном травлении, если имеет значение горизонтальный перенос вещества между зародышами. Дegrадация прибора при неоднородном воздействии на его части, сопряженном с его эксплуатацией или хранении в условиях повышенной радиации или банального протекания электрического тока. Обмен кислородными вакансиями и прочими дефектами между соседними мемристорами в матрице памяти или нейроморфного вычислителя

Литература

1. Stempkovsky A. L., Gavrilov S. V., Matyushkin I. V., Teplov G. S. On the issue of application of cellular automata and neural networks methods in VLSI design // Optical Memory and Neural Networks, 2016. Vol. 25. №2. P. 72–78. DOI: 10.3103/S1060992X16020065. EDN WVVLDL.

2. Матюшкин И. В., Тельминов О. А. Формально-философские вопросы коннекционизма и актуальные проблемы разработки нейроморфных систем // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 2 (186). — С. 49–59. DOI: 10.7868/S2410993222020099. EDN LWHCSF.
3. Evstafieva M., Redkin A., Roshchupkin D. et al. Influence of Exposure to a Wet Atmosphere on the UV-Sensing Characteristics of ZnO Nanorod Arrays // Materials, 2024. Vol. 17. № 5. P. 1053. DOI: 10.3390/ma17051053. EDN VZYFAN.

УДК 538.9

Низкий разброс мемристивных характеристик нанокompозитных структур $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ с прослойкой LiNbO_3

Ильясов А. И.^{1,2}, Емельянов А. В.¹, Черноглазов К. Ю.¹, Ситников А. В.¹, Рыльков В. В.¹, Форш П. А.², Демин В. А.¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт»

123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Изучены характеристики мемристоров на основе нанокompозита $(\text{CoFeB})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ и слоя LiNbO_3 , в том числе напряжения переключений, устойчивость к циклическим переключениям и их многоуровневый характер. Показана возможность плавного изменения резистивного состояния последовательностью одинаковых импульсов в зависимости от их количества, а также по биоподобным правилам STDP. Была предложена качественная модель резистивного переключения в изученных мемристорах. Продемонстрирована возможность построения нейроморфных сетей на основе данных мемристоров.

Ключевые слова: мемристор; резистивное переключение; нанокompозит; пластичность; STDP.

Мемристоры — перспективные устройства микроэлектроники, изменяющие свое сопротивление при приложении напряжения, и способные сохранять резистивное состояние при прекращении внешнего воздействия [1]. Это свойство мемристоров делает их прекрасными кандидатами для использования в качестве синапсов в формальных и импульсных нейроморфных сетях. Одними из важнейших мемристивных свойств для такого применения являются пластичность — количество различных резистивных состояний — а также большое время их удержания. Это может быть достигнуто путем использования нанокompозитов, в том числе на основе диэлектриков с высокой энергией связи кислорода (миграция которого во многих материалах и обуславливает резистивное переключение (РП)), таких как SiO_2 , ZrO_2 и др.

В работе изучались мемристоры $\text{Cu}/(\text{Co-Fe-B})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}/\text{LiNbO}_3/\text{Cu}$ (CFBSO), выполненные в конденсаторной геометрии. Их вольт-амперные характеристики (рис. 1а) демонстрируют хорошо повторяемые резистивные переключения (РП) с обратной полярностью (переход в низкоомное состояние при отрицательном напряжении на верхнем электроде). Это обстоятельство существенно отличает их от ранее исследованных мемристоров на основе $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{LiNbO}_3$ (CFBLNO), в которых переключения имеют прямую полярность [2, 3]. Была предложена качественная модель РП в структурах CFBSO, согласно которой переключение происходит за счет миграции атомов меди из нижнего электрода в диэлектрическую прослойку LiNbO_3 при приложении отрицательного напряжения к верхнему электроду. При этом миграция вакансий кислорода при приложении напряжения противоположной полярности (лежащая в основе РП в структурах CFBLNO) ограничена самоорганизованным тонким барьерным слоем SiO_x между

нанокompозитом $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ и ниобатом лития. Этот слой был обнаружен с помощью электронной микроскопии. Показано, что помимо стабильно повторяемых РП, изученные мемристоры устойчивы к, по крайней мере, 10^4 циклам переключений, могут принимать не менее 16 различных стабильных резистивных состояний (рис. 1б). Продемонстрирована их способность изменять свое сопротивление по правилам STDP при различных параметрах и формах импульсов, а также возможность тонкой настройки их резистивного состояния последовательно одинаковых прямоугольных импульсов, при этом состояние задается только количеством таких импульсов, но не их параметрами. Полученные результаты могут быть использованы для реализации кроссбар-массивов мемристоров на основе нанокompозита $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, а также для создания различных формальных и импульсных вычислительных систем на основе таких мемристоров.

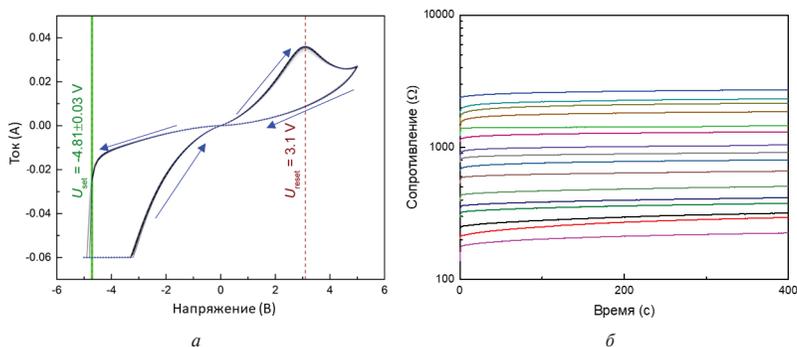


Рис. 1. Характеристики мемристоров: а) Вольт-амперные кривые; б) пластичность — удержание 16-ти резистивных состояний

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-79-10185-П).

Литература

1. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. // Nature, 2008. Vol. 453. № 7191. P. 80–83. URL: <http://doi.org/10.1038/nature06932>.
2. Рыльков В. В., Емельянов А. В., Николаев С. Н. и др. // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2020. — Т. 158. — № 1 (7). — С. 164–183. — URL: <http://doi.org/10.31857/s0044451020070159>.
3. Дёмин В. А., Ильясов А. И., Рыльков В. В. и др. // Российские нанотехнологии, 2023. — Т. 18. — № 2. — С. 276–288. — URL: <http://doi.org/10.56304/s199272232302005x>.

УДК 538.956

Визуализация и исследование эволюции проводящих филаментов в резистивно-переключаемых структурах Pt/TaO_x/Ta методом EBIC**Коростылёв Е. В., Жук М. Ю., Черникова А. Г., Савельева Е. О., Мутаев И. А., Коробкин Е. Н.***Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
korostylev.ev@phystech.edu*

В данной работе демонстрируется возможность использования метода наведенного тока электронным пучком (electron beam-induced current, EBIC) для визуализации проводящих филаментов и *in-situ* исследования их эволюции при циклировании резистивно-переключаемых структур Ta/TaO_x/Pt, перспективных в качестве основных компонентов нового поколения энергонезависимой памяти, а также нейроморфных вычислительных систем. В работе обсуждаются также специфические особенности формирования филаментов в структурах Ta/TaO_x/Pt при их реализации в кросс-бар массивах, что особенно актуально с точки зрения практического использования.

Ключевые слова: TaO_x; резистивное переключение; резистивная память; метод наведенного тока.

Современные прикладные задачи, такие как распознавание образов и речи, выявили существенные недостатки в использующихся на сегодняшний день фон-Неймановских архитектурах вычислений, в том числе: высокое энергопотребление и низкая скорость при вычислениях и перемещении данных между памятью и процессором. Для оптимизации вычислительных процессов как в части энергопотребления, так и в части скорости, на сегодняшний день предлагается несколько взаимодополняющих подходов. В их числе внедрение в существующие архитектуры нового класса памяти (storage class memory, SCM) [1], а также создание новых вычислительных архитектур, эмитирующих работу мозга — нейроморфных систем [2]. Интересно, что для реализации обоих подходов могут применяться структуры металл — изолятор — металл (МИМ) с резистивным переключением. Действительно, так называемая резистивная память произвольного доступа (resistive random access memory, ReRAM), благодаря своей относительно простой структуре и масштабируемости, а также возможности обеспечить одновременно большое число циклов перезаписи, высокую скорость чтения/записи, а также энергонезависимость [1], является на сегодняшний день одним из самых перспективных кандидатов на роль SCM. Вместе с тем возможность реализации многоуровневого переключения и демонстрация синаптических свойств некоторых МИМ структур с резистивным переключением, позволяет рассматривать такие структуры и в качестве основы нейроморфных систем [2].

Стоит отметить, что классическое резистивное переключение в МИМ структурах на основе оксидов переходных металлов, которые обладают максимальной перспективностью для использования в современной микроэлектронике



благодаря в первую очередь своей масштабируемости и технологической совместимостью с кремниевым производством, описывается моделью формирования проводящих каналов (филаментов). Лежащее в основе данной модели представление о необходимости первоначального формирования в диэлектрическом слое под действием достаточно высокого электрического поля филаментов (так называемый обратимый пробой), состоящих из кислородных вакансий, которые впоследствии могут частично «залечиваться» и формироваться вновь, приводя к тому, что МИМ структура будет демонстрировать различные сопротивления в данных состоянии: высокое (R_{off}) и низкое (R_{on}), хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Отметим, что несмотря на то, что в последнее время внимание научного сообщества все чаще привлекает возможность реализации нефиламентарного резистивного переключения, основанного на окислительно-восстановительных реакциях во всем объеме диэлектрика, филаментарное резистивное переключения в структурах на основе, например, оксида тантала (TaO_x), по-прежнему называют ключом к решению вышеобозначенных задач [3, 4]. Вместе с тем, на сегодняшний день очевидно, что многие недостатки резистивно-переключаемых структур, такие как разброс параметров переключения (R_{on} , R_{off} , напряжение формовки и пр.) связаны как раз со стохастической природой формирования филаментов. В этой связи, очевидно, что для оптимизации функциональных свойств структур необходима разработка методов прецизионной визуализации и контроля размеров и количества филаментов, а также динамики изменения их свойств в процессе многократных переключений МИМ ячеек. Для данных исследований может быть применен метод проводящей атомно-силовой микроскопии (conductive atomic force microscopy, CAFM) [5], а также просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [6], однако оба данных метода требуют сложной пробоподготовки и не могут применяться рутинно.

В данной работе мы впервые демонстрируем возможность использования так называемого метода наведенного тока электронным пучком (electron beam induced current, EBIC) для визуализации проводящих филаментов и исследования их эволюции при циклировании резистивно-переключаемых структур Ta/ TaO_x /Pt. Данные структуры были реализованы в составе кросс-бар массивов, что является актуальным с точки зрения существующего запроса на реализацию больших объемов памяти, как в случае SCM, так и в случае нейроморфных систем. Установленные закономерности формирования филаментов в кросс-барах и особенности их эволюции, позволят использовать EBIC в общем и результаты данной работы в частности для построения перспективных вычислительных систем.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и образования Российской Федерации (проект № 075-15-2023-448) с использованием оборудования Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий МФТИ.

Литература

1. Hudec B., Hsu C.-W., Wang I.-T., Lai W.-L., Chang C.-C., Wang T., Fröhlich K., Ho C.-H., Lin C.-H., Hou T.-H. et al. 3D resistive RAM cell design for high-density storage class memory—a review // Science China Information Sciences, 2016. 59, 6, 1–21.

2. Ielmini D., Ambrogio S. Emerging neuromorphic devices // *Nanotechnology*, 2020. 31, 9.
3. Yang J. J., Zhang M.-X., Strachan J. P., Miao F., Pickett M. D., Kelley R. D., Medeiros-Ribeiro G., Williams R. S. High Switching Endurance in TaO_x Memristive Devices // *Appl. Phys. Lett.*, 2010. 97, 232102.
4. Prakash A., Jana D., Maikap S. TaO_x-Based Resistive Switching Memories: Prospective and Challenges // *Nanoscale Res. Lett.*, 2013. 8, 418.
5. Koroleva A. A., Chernikova A. G., Chouprik A. A., Gornev E. S., Slavich A. S., Khakimov R. R., Korostylev E. V., Hwang C. S., Markeev A. M. Impact of the Atomic Layer-Deposited Ru Electrode Surface Morphology on Resistive Switching Properties of Ta-O_x-Based Memory Structures ACS // *Appl Mater Interfaces*, 2020. 12 (49) P. 55331–55341.
6. Takahashi Y., Kudo M., Fujiwara I., Shimuta M., Ohba K., Arita M. Visualization of Conductive Filament during Write and Erase Cycles on Nanometer-Scale ReRAM Achieved by In-Situ TEM // 2015 IEEE International Memory Workshop (IMW), Monterey, CA, 2015. P. 1–4.

УДК 537.312.7

Мемристивные свойства МДП-структур на основе сегнетоэлектрического оксида гафния на кремнии

Савичев И. А., Марголин И. Г., к. ф.-м. н., Чуприк А. А.

*Московский физико-технический институт**(национальный исследовательский университет)**141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9**ilya.savichev@phystech.edu*

Экспериментально исследованы мемристивные свойства структуры металл-сегнетоэлектрик-полупроводник на основе оксида гафния и циркония (HZO) в качестве сегнетоэлектрика на монокристаллическом кремнии. Показана существенная зависимость мемристивных свойств от толщины HZO.

Ключевые слова: memristor; retention loss; ferroelectric; hafnia oxide.

С 2008 года ставший неотъемлемой частью современной КМОП-технологии как подзатворный диэлектрик [1], оксид гафния обладал скрытым потенциалом, открытым в 2011 году, когда были обнаружены сегнетоэлектрические свойства в легированных тонких пленках HfO_2 [2]. Применение сегнетоэлектрических свойств оксида гафния представляет наибольший интерес в области энергонезависимой памяти и нейроморфных вычислений. Альтернативные запоминающие устройства на основе сегнетоэлектриков уже обладают значительно большим ресурсом и высокой скоростью чтения-записи по сравнению со все еще преобладающей на рынке энергонезависимой памяти флеш-памятью [3]. Нейроноподобные системы с функциональным сегнетоэлектрическим слоем являются отличным кандидатом для реализации нейроморфных вычислений, поскольку позволяют ускорить такие вычисления на аппаратном уровне и повысить энергоэффективность таких устройств [4].

Для построения нейроноподобных систем некоторые элементарные ячейки сегнетоэлектрической памяти, например, сегнетоэлектрический полевой транзистор (FeFET) и сегнетоэлектрический туннельный переход (FTJ), обладают явными преимуществами, а именно: недеструктивным считыванием информации и высокой степенью масштабируемости. Функционал подобных ячеек памяти основан на электрофизических свойствах структуры металл-сегнетоэлектрик-полупроводник, исследование и улучшение которых приведет в будущем к их полноценной интеграции в реальные (коммерчески успешные) устройства.

В данной работе представлены результаты исследования мемристивных свойств функциональных сегнетоэлектрических структур $\text{Si}/\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2/\text{TiN}$ на основе $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ различной толщины (5, 6, 7, 8 и 10 нм). Показано, что резистивное переключение в данных структурах обусловлено эффектом изменения формы потенциального барьера вследствие переключения сегнетоэлектрической поляризации. Продемонстрирована достижимость большого количества резистивных состояний (16 и более). Отношение высокоомного и низкоомного состояний зависит от толщины и достигает максимального значения ($R_{\text{OFF}}/R_{\text{ON}} = 20$) при толщине $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$, равной 10 нм, что указывает на то, что доминирующим механизмом токового транспорта в резистивных структурах, является не прямое туннелирование. Показано, что для всех пленок токовый транспорт наиболее хорошо

описывается механизмом скачкообразного туннелирования по ловушкам. Кроме того, установлено, что время хранения состояния в сегнетоэлектрических мемристорах ограничено вследствие наличия в сегнетоэлектрическом слое сильного электрического (деполяризующего) поля. Источником деполяризующего поля являются поверхностные состояния на границе раздела полупроводник/сегнетоэлектрик, энергетические уровни которых находятся в запрещенной зоне полупроводника и способны к быстрому обмену носителями заряда с полупроводником с последующим захватом заряда. Таким образом, в сегнетоэлектрическом слое индуцируется электрическое поле, которое приводит к подавлению одного из двух состояний поляризации и стабилизации второго состояния. Установлено, что плотность поверхностных состояний на границе раздела pSi(100)/Hf_{0,5}Zr_{0,5}O₂ составляет 10¹³ см⁻² эВ⁻¹, а деполяризующее поле достигает 2,3 МВ/см для МДП структур на основе Hf_{0,5}Zr_{0,5}O₂ толщиной 5 нм. Закономерно, скорость потери состояния в мемристорах существенно уменьшается при увеличении толщины сегнетоэлектрического слоя от 5 до 10 нм. Помимо этого, в работе было изучено влияние интерфейсного слоя SiO₂ и типа основных носителей (электронов и дырок) в полупроводниковом электроде на мемристивные свойства исследуемых структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-03-2024-117, проект № FSMG-2022-0031).

Литература

1. Packan P. et al. High performance 32 nm logic technology featuring 2nd generation high-k+ metal gate transistors // 2009 IEEE international electron devices meeting (IEDM). IEEE, 2009. P. 1–4.
2. Böске T. S. et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // Applied Physics Letters, 2011. Vol. 99. № 10.
3. Jeong D. S. et al. Emerging memories: resistive switching mechanisms and current status // Reports on progress in physics, 2012. Vol. 75. № 7. P. 076502.
4. Lederer M. et al. Ferroelectric field effect transistors as a synapse for neuromorphic application // IEEE Transactions on Electron Devices, 2021. Vol. 68. № 5. P. 2295–2300.

УДК 621.38-022.532

Эффект резистивного переключения в конденсаторных и кроссбар-структурах на основе поли-п-ксилилена

Швецов Б. С.^{1,2}, Емельянов А. В.¹¹ НИЦ «Курчатовский институт»

123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

² Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова

119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

b.shvetsov15@physics.msu.ru

В данной работе проведено исследование эффекта резистивного переключения в структурах на основе поли-п-ксилилена, заключенного между двумя металлическими электродами. Были изучены электрофизические свойства конденсаторных и кроссбар-структур, разработаны качественная и количественная модели резистивного переключения, а также продемонстрирована реализация простых импульсных и формальных нейроморфных систем на их основе.

Ключевые слова: мемристоры; резистивное переключение; нейроморфные вычисления; искусственный интеллект.

Введение

В настоящее время классические вычислительные системы, которые основаны на архитектуре фон Неймана с разделением мест хранения данных от мест их обработки, практически достигли своего предела развития. Мемристоры широко рассматриваются как перспективные компоненты для создания новых типов памяти и нейроморфных вычислительных систем (НВС). Принцип его работы основан на эффекте резистивного переключения (РП), который заключается в изменении удельного электрического сопротивления при протекании заряда и приложении порогового электрического поля. Благодаря этому мемристоры могут иметь несколько резистивных состояний и хранить заданное резистивное состояние после снятия электрического поля. Эти свойства позволяют использовать мемристоры в НВС в качестве аналогов синапсов, соединяющих нейроны и действующих как клетки памяти. Несмотря на то, что в мемристивных элементах на основе поли-п-ксилилена (ППК) продемонстрирован стабильный эффект РП [1], детального изучения его механизма на момент постановки задач данной работы не было проведено. А также не была исследована возможность задания промежуточных состояний (возможность многоуровневого РП, т. е. их пластичность) в таких мемристорах. Также особый интерес представляет возможность изменения резистивного состояния мемристора по биологически правдоподобным алгоритмам, например пластичности, зависящей от времени прихода импульсов (spike-timing-dependent plasticity, STDP). Для реализации НВС на основе мемристоров необходимо изучение возможности их масштабирования в, так называемой, кроссбар-геометрии. Кроссбар-структуры представляют собой набор поперечных шин электродов, между которыми находится функциональный слой диэлектрика [2]. На основе кроссбар-массивов можно построить эффективные НВС, так как с их помощью легко реализовать наиболее ресурсоемкую для традиционных вычислительных систем операцию умножения вектора входящих импульсов на матрицу синаптических

весов (векторно-матричное умножение) согласно физическим законам (законы Ома и Кирхгофа). В таких структурах информация хранится и обрабатывается непосредственно в элементах памяти, поэтому они отличаются высокой энергоэффективностью. В то же время для мемристивных структур на основе ППК ранее не проводилось исследований по их масштабированию в кроссбар-геометрии, а также по построению на основе таких массивов НВС. Поэтому целью данной работы было изучение РП в мемристивных структурах на основе ППК в конденсаторной и кроссбар-геометриях и исследование возможности их применения для построения эффективных НВС.

Результаты

Конденсаторные и кроссбар-структуры на основе $\text{Cu}/\text{ППК}/\text{M}$ демонстрируют стабильные обратимые РП с высокой выносливостью (более 10^3 циклов), пластичностью (>16 состояний) и длительным удержанием состояний ($>10^4$ с) [3]. Механизм РП основан на образовании/разрушении металлического мостика в слое ППК под действием электрического поля [4]. Резистивные переключения происходят по малому числу филаментов. Разработанная компактная феноменологическая модель позволяет описать ВАХ с точностью не хуже 0,4 %. Мемристивные структуры на гибкой подложке демонстрируют стабильные РП вплоть до радиуса изгиба 10 мм. Исследованные мемристоры способны эмулировать синапсы в спайковых НВС с ассоциативным обучением. Проводимость (вес синапса) мемристивных структур может изменяться по правилам STDP, в том числе при их дофаминоподобной модуляции [5]. Мемристивные структуры масштабируются в архитектуре кроссбар. На основе мемристоров в кроссбар-архитектуре возможна реализация формальных НВС, способных обучаться распознавать бинарные образы [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-19-00200) с использованием оборудования Ресурсных центров (НИЦ «Курчатовский институт»).

Литература

1. Li Y., Wang Z., Midya R., Xia Q., Joshua Yang J. Review of memristor devices in neuromorphic computing: Materials sciences and device challenges // J. Phys. D. Appl. Phys., 2018. Vol. 51. № 50. P. 0–12.
2. Gi S., Yeo I., Chu M., Kim S., Lee B. Fundamental issues of implementing hardware neural networks using memristor // ISOC 2015 — Int. SoC Des. Conf. SoC Internet Everything, 2016. P. 215–216.
3. Minnekhanov A. A., Emelyanov A. V., Lapkin D. A., Nikiruy K. E., Shvetsov B. S., Nesmelov A. A., Rylkov V. V., Demin V. A., Erokhin V. V. Parylene Based Memristive Devices with Multilevel Resistive Switching for Neuromorphic Applications // Scientific reports, 2019. Vol. 9. Article number: 10800.
4. Minnekhanov A. A., Shvetsov B. S., Martyshov M. N., Nikiruy K. E., Kukueva E. V., Presnyakov M. Yu., Forsh P. A., Rylkov V. V., Erokhin V. V., Demin V. A., Emelyanov A. V. On the resistive switching mechanism of parylene-based memristive devices // Organic Electronics, 2019. Vol. 74. P. 89–95.

5. Minnekhanov A. A., Shvetsov B. S., Emelyanov A. V., Chernoglazov K. Yu., Kuku-eva E. V., Nesmelov A. A., Grishchenko Yu. V., Zhanaveskin M. L., Rylkov V. V., Demin V. A. Parylene-based memristive synapses for hardware neural networks capable of dopamine-modulated STDP learning // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021. Vol. 54. № 48. P. 484002.
6. Shvetsov B. S., Minnekhanov A. A., Emelyanov A. V., Ilyasov A. I., Grishchenko Yu. V., Zhanaveskin M. L., Nesmelov A. A., Streltsov D. R., Patsaev T. D., Vasiliev A. L., Rylkov V. V., Demin V. A. Parylene-based memristive crossbar structures with multi-level resistive switching for neuromorphic computing // *Nanotechnology*, 2022. Vol. 33. № 25. P. 255201.

УДК 004.896

Применение нейронных сетей в операциях контроля микро- и наноструктур

Францышин Д. В.^{1,2}, Панфилова Е. В.¹, Ибрагимов А. Р.¹, Кошелева М. А.¹¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

panfilova.e.v@bmsu.ru

² ООО «Остек-ЭК»

121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2

Frantsyshin.D@ostec-group.ru

Коллоидные фотонные кристаллы представляют собой периодические структуры, способные контролировать распространение света. Базовым этапом их создания является операции контроля структур. В этой работе разработана нейросеть для оптимизации процесса сканирования при исследовании образцов методом АСМ.

Ключевые слова: коллоидные фотонные кристаллы; нейронная сеть; артефакты; атомно-силовая микроскопия.

Основой многих устройств фотоники и микроэлектроники могут служить коллоидные фотонные кристаллы (КФК) — пространственно упорядоченные системы периодической модуляцией диэлектрической проницаемости, полученные в результате самоорганизации коллоидных частиц.

Важным этапом создания КФК является операции контроля получаемых структур. Как правило, для проведения рутинного контроля используют атомно-силовую микроскопию (АСМ). Оптимизация параметров сканирования коллоидных фотонно-кристаллических пленок имеет решающее значение для получения высококачественных изображений лишенных артефактов и дальнейшего анализа их структурных и оптических свойств. Однако осуществляемый «вручную» подбор параметров сканирования может быть трудоемким и неэффективным, особенно для развитых поверхностей коллоидных пленок [1, 2, 3].

В этом проекте разработана нейронная сеть для автоматической оптимизации параметров сканирования АСМ для КФК.[4] Нейросеть использует глубокое обучение для установления взаимосвязи между параметрами сканирования и качеством получаемых изображений [5]. Обученная нейросеть способна в процессе сканирования предлагать корректировки основных параметров процесса для различной геометрии КФК, что позволяет значительно ускорить и повысить точность процесса контроля [6].

Результаты работы будут использованы в научных исследованиях, образовательном процессе, а также при отработке технологии изготовления опытных образцов устройств на основе КФК.

Литература

1. Carracedo-Cosme J., Romero-Muñiz C., Pérez R. A deep learning approach for molecular classification based on AFM images // *Nanomaterials*, 2021. Vol. 11. № 7. P. 1658.

2. Luo Y., Andersson S. B. Image reconstruction for sub-sampled atomic force microscopy images using deep neural networks // *Micron*, 2020. Vol. 130. P. 102814.
3. Liu Y. et al. General resolution enhancement method in atomic force microscopy using deep learning // *Advanced Theory and Simulations*, 2019. Vol. 2. № 2. P. 1800137.
4. Panfilova E. V., Ibragimov A. R., Mozer K. V. Neural network module for tuning an atomic force microscope in the study of photonic crystal films // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. Vol. 1571. № 1. P. 012004.
5. Бредихин А. И. Алгоритмы обучения сверточных нейронных сетей // *Вестник Югорского государственного университета*, 2019. — № 1 (52). — С. 41–54.
6. Ха Л. М. Сверточная нейронная сеть для решения задачи классификации // *Труды Московского физико-технического института*, 2016. — Т. 8. — № 3 (31). — С. 91–97.

УДК 621.3.049

Объектно-процессное моделирование нейроморфных систем

Дорофеев В. П.

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

dorofeev.vp@phystech.edu

Приведен обзор использования объектно-процессной методологии и теории категорий для разработки и анализа кросс-дисциплинарных систем. Продемонстрированы возможности их использования для искусственных и естественных нейроморфных систем.

Ключевые слова: системный инжиниринг; объектно-процессное моделирование; нейроморфные системы; теория категорий.

Разработка современных нейроморфных систем — кросс-дисциплинарная область, включающая в себя области знаний от физики наноструктур до технологий микроэлектроники и робототехники [1]. Для преодоления междисциплинарного барьера с начала 20-го века развивается системная наука [2]. И в настоящее время основанный на моделировании системный инжиниринг становится стандартом в разработке сложных систем [3].

Одним из современных подходов к системному инжинирингу является объектно-процессное моделирование (OPM). OPM обеспечивает концептуальное моделирование системы при помощи двух типов сущностей: объектов и процессов, а также структурных и процедурных связей между ними [4]. Его преимуществами по отношению к SysML являются:

- единая модель для структуры, функциональности и поведения системы;
- теоретическое обоснование возможности использования для разных типов систем и примеры такого моделирования.

Зрелость методологии подтверждает стандарт ISO 19450:2024 Automation systems and integration — Object-Process Methodology, а также его использование в академических и прикладных исследованиях и разработках в MIT и NASA. Для повышения уровня формализации описания и анализа систем методология дополняется теорией графов и теорией категорий. В [5] представлен метод использования теории категорий для разработки мехатронной системы экспертами из разных областей знаний. В [6] предложен цикл Концепция — Модель — Граф — Представление для разработки систем с использованием OPM на базе теории категорий. В [7] продемонстрировано применение этого метода на примере электромобиля.

Для проверки применимости описанного выше метода к исследованиям и разработкам нейроморфных систем были выбраны следующие работы. [8] — система управления роботизированной рукой при помощи нейроморфного чипа Reckon, внедренного на базе Xilinx MPSoC. Источниками для анализа исследования являются публикации, код чипа на Verilog, и программный код обучения и использования чипа на Python. [9] — нейроморфный чип Tianmou, имитирующий работу визуальной системы человека, и его использование в системе автономного управления автомобилем. [10] — нейробиологическое исследование хранения семантической информации в нейронах головного мозга человека.



Предварительные результаты работы позволяют говорить о том, что объектно-процессное моделирование помогает систематизировать области знаний и позволяет формировать единую базу знаний в исследуемой области. Применение теории категорий в процессе разработки.

Литература

1. Михайлов А. Н. и др. На пути к реализации высокопроизводительных вычислений в памяти на основе мемристорной электронной компонентной базы // Физмат, 2023. — № 1. С. 42–64. DOI: 10.56304/S2949609823010021.
2. Богданов А. А. Тектология. Всеобщая организационная наука. — 1913.
3. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). INCOSE, 2023.
4. Dori D. Model-based systems engineering with OPM and SysML. New York: Springer, 2016. Vol. 15.
5. Fradi M. et al. Knowledge capitalization in mechatronic collaborative design // Concurrent Engineering, 2022. Vol. 30. № 1. P. 32–45.
6. Mordecai Y., Fairbanks J. P., Crawley E. F. Category-theoretic formulation of the model-based systems architecting cognitive-computational cycle // Applied Sciences, 2021. Vol. 11. № 4. P. 1945.
7. Mordecai Y., Engel A. Systems Engineering Using Category Theory // Systems Science for Engineers and Scholars, 2024. P. 410–447.
8. Linares-Barranco A. et al. Adaptive Robotic Arm Control with a Spiking Recurrent Neural Network on a Digital Accelerator // arXiv:2405.12849v2.
9. Yang Z. et al. A vision chip with complementary pathways for open-world sensing // Nature, 2024. Vol. 629. № 8014. P. 1027–1033.
10. Jamali M., Grannan B., Cai J. et al. Semantic encoding during language comprehension at single-cell resolution // Nature, 2024. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07643-2>.

УДК 004.8

Гетерогенная вычислительная система для задач локального искусственного интеллекта

Кателкин Н. И.¹, Бабинцев Л. В.¹, Баулин Ф. А.¹, Ильянова Д. С.¹, Рожин А. К.¹, Минеев А. В.¹, Нефедов С. И.¹, Соловьев Д. В.²

¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20*

*nikatelkin@edu.hse.ru, lvbabintsev@edu.hse.ru, fabaulin_2@edu.hse.ru,
dsilyanova@edu.hse.ru, akrozhin@edu.hse.ru, avmineev@edu.hse.ru,
snefedov@hse.ru*

² *Компания VK, департамент ИИ
d.soloviev@corp.mail.ru*

В работе рассмотрены проблемы проектирования архитектуры гетерогенных вычислительных систем для задач локального искусственного интеллекта. Приводятся результаты разработки, макетирования и исследования производительности аппаратно-программного комплекса, реализующего вывод нейронных сетей.

Ключевые слова: искусственный интеллект; нейронные сети; энергоэффективные вычислительные системы.

Рост популярности алгоритмов искусственного интеллекта дает толчок развитию специализированных вычислителей. В ряде прикладных задач требуется обеспечить конфиденциальность персональных данных; а также высокую скорость отклика нейронной сети; несмотря на физическую удаленность клиентского устройства от сервера-вычислителя [1]. Для решения этих проблем; возникает необходимость интеграции вычислителя искусственного интеллекта непосредственно в устройство [2]. При этом этапы сбора входных данных; их предобработка и постобработка результата ложится на уже имеющиеся аппаратные блоки. Подобная система называется гетерогенной; потому как реализуется в виде системы на кристалле (СнК); в которой объединены по интерфейсу коммуникации центральный процессор (CPU); графический процессор (GPU); процессоры ЦОС (DSP) и нейропроцессор (NPU). Совместная работа разнородных аппаратных блоков позволяет локализовать вычисления искусственного интеллекта.

В докладе приводятся результаты проектирования, макетирования и исследования производительности АПК. Представлены результаты прототипирования аппаратной архитектуры, состоящей из свободно распространяемого soft-процессорного ядра RISC-V, оригинального IP-блока для выполнения операции матричного умножения, архитектура которого предложена в [3], и лицензированных IP-блоков для периферии. Процессорная система развернута на ПЛИС Xilinx Kintex 7. Программная архитектура использует передовые зарубежные технологии, такие как MLIR, LLVM Tensorflow Lite, обеспечивающие бесшовный переход с иностранного вычислительного оборудования, на представленную систему.

Проектирование архитектуры гетерогенных систем создает дополнительные осложнения модели памяти разнородных вычислительных блоков: необходимо обеспечить разграничение доступа, разделение всей памяти на общие для различных частей системы и оптимизировать переиспользование имеющихся данных.



Повышаются требования к совместимости типов данных и диспетчеризации обмена информацией между подсистемами. Для подобных систем применяются сети на кристалле (Network on Chip), позволяющие обеспечить информационный обмен между аппаратными блоками подобно компьютерной сети. Возникает проблема эффективного и динамического планирования операций нейронных сетей, для достижения высокой утилизации имеющихся аппаратных ресурсов при ограниченном энергопотреблении.

Литература

1. Shuvra S. Bhattacharyya, Ed F. Deprettere, Rainer Leupers, Jarmo Takala Handbook of Signal Processing Systems. — 3-е изд. — Springer, 2019.
2. Vivienne Sze, Yu-Hsin Chen, Tien-Ju Yang, Joel S. Emer. Efficient Processing of Deep Neural Networks, 2020.
3. Ильянова Д. С., Минеев А. В. Спецификация IP-блок MPU. — URL: <https://docs.google.com/document/d/157agtXzvEhlxsNe2aMuDYzbJ2sMPi2iT/edit?usp=sharing&oid=110922532473366364478&rtpof=true&sd=true>.

УДК 004.9 + 004.4

Нейроэлектронные интерфейсы для улучшения моторных функций в спорте и реабилитации

Гордлеева С. Ю.^{1,2}¹ *Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23*² *АНО Неймарк**603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23*

Доклад посвящен вопросам создания систем нейрорегуляции от биоэлектрических (ЭЭГ, ЭМГ, ЭКГ и т. п.) сигналов человека для функциональных реабилитационных экзоскелетных комплексов для целей реабилитации двигательных нарушений. Будет представлен разработанный на основе технологий искусственного интеллекта мультимодальный нейроинтерфейс для классификации в реальном времени ЭЭГ и ЭМГ сигналов, генерируемых в условиях управления экзоскелетом нижних конечностей при попытке сделать шаг [1]. Будет представлена разработанная нейроинтегрированная система управления экзоскелетным роботизированным комплексом (ЭРК) нижних конечностей на основе технологии «интерфейс мозг–компьютер» (ИМК), которая основана на распознавании паттернов ЭЭГ, вызываемых воображением движений конечностями. Будут освещены подходы к разработке моделей и технологий нейроморфного и интерпретируемого искусственного интеллекта для задач анализа мультимодальных биоэлектрических сигналов, на основе которых возможно создание прототипов нейроинтерфейсов и систем нейрорегуляции для реабилитации и протезирования. Будут освещены подходы к созданию нейроинтерфейсов с контурами мультимодальных биологических обратных связей (визуальной, вибротактильной и транскраниальной магнитной стимуляцией) для улучшения когнитивных функций и моторной координации у людей [2].

Ключевые слова: нейроинтерфейсы; интерфейс мозг–компьютер; искусственный интеллект; реабилитация; электроэнцефалограмма; электромиограмма; двигательные нарушения.

Литература

1. Gordleeva S. Y., Lobov S. A., Grigorev N. A., Savosenkov A. O., Shamshin M. O. Real-time EEG–EMG human–machine interface-based control system for a lower-limb exoskeleton // IEEE Access, 2020. 8, 84070–84081.
2. Grigorev N., Savosenkov A., Lukoyanov M., Udoratina A., Shusharina N., Hramov A., Kazantsev V., Gordleeva S. A BCI-Based Vibrotactile Neurofeedback Training Improves Motor Cortical Excitability During Motor Imagery // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2021. 29, 1583–1592. DOI: 10.1109/TNSRE.2021.3102304.



УДК 004.738.2: 004.087.5: 004.056.55

Прототип программно-аппаратного комплекса для защищенных мобильных коммуникаций с использованием технологии квантового распределения ключей

Чухнов И. А.^{1,2,3}, к. ф.-м. н. Зайцев Д. Л.¹, к. ф.-м. н. Криштоп В. Г.^{1,4}, к. ф.-м. н. Кузнецов А. С.^{1,5}, Буканов Е. А.^{1,5}, Молчанов М. А.¹, Поздняков А. М.^{1,3}, Павлов И. Д.⁶, д. ф.-м. н. Андреев С. Н.^{1,3}

¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

² АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

³ АО «ЦИР»

101000, г. Москва, Милютинский пер., 13, стр. 1, пом. 1

⁴ АО «ИнфоТеКС»

127287, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б

⁵ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

⁶ ООО «КуРэйт»

115419, г. Москва, 2-й Донской проезд, 9, стр. 3

Разработан прототип программно-аппаратного комплекса для передачи защищенных сообщений с мобильного терминала с использованием технологии квантового распределения ключей. Система позволяет осуществлять передачу сообщений в режиме реального времени и в режиме электронной почты.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей; квантовая мобильная связь; защищенный обмен сообщениями.

Квантовое распределение ключей (КРК) — технология распределения симметричных криптографических ключей с использованием квантовых состояний одиночных фотонов. Принципы квантовой физики обеспечивают практическую нереализуемость компрометации таких ключей [1].

Предложенное решение представляет собой программно-аппаратный комплекс (ПАК), позволяющий производить обмен защищенными сообщениями с использованием защищенного токена-носителя квантово-защищенных ключей. Пользовательское устройство (телефон) имеет недостаточный класс защиты для хранения ключей сети и поэтому использует специализированный токен. Пользовательское устройство оснащается специализированным программным обеспечением (мессенджером) для передачи информации между несколькими абонентами с применением сквозного шифрования с использованием диверсифицированного квантового ключа.

ПАК включает систему КРК, токен на базе защищенного отечественного микроконтроллера и специализированное программное обеспечение, включающее мессенджер с криптографической защитой передаваемых сообщений для смартфона. Токен с исходным квантово-защищенным мастер-ключом выполняет диверсификацию и выдачу производного сессионного ключевого материала согласно рекомендациям [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке АО «ЦИР» (АФК «Система»).

Литература

1. Trushechkin A. S., Kiktenko E. O., Kronberg D. A. and Fedorov A. K. Security of the decoy state method for quantum key distribution // Phys. Usp., 2021. 64, 88.
2. Рекомендации по стандартизации Р 50.1.113-2016, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии.

УДК 004.056

Особенности создания программно-аппаратного комплекса защищенной передачи данных в мобильных сетях стандартов 4G/5G с применением технологий квантового распределения ключей

Маврин Е. М.

Сколковский институт науки и технологий

*121205, г. Москва, Территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1*

В связи с ростом вычислительной мощности компьютерных сетей, становится необходимостью применение новых инструментов и подходов для защиты, передаваемой в открытых сетях данных. Применение технологии квантового распределения ключей для передачи пользовательских данных и создание программно-аппаратных комплексов для реализации данных функций является одним из решений данной проблемы.

В рамках работ по созданию такого защищенной передачи данных в мобильных сетях стандартов 4G/5G с применением технологий квантового распределения ключей было изучено несколько подходов по его созданию: возможность интеграции комплекса в существующие сети связи актуальных стандартов (5G OpenRAN) и реализация решения для отечественных мобильных операционных систем, в частности, для ОС Аврора.

Доклад содержит описание особенностей разработки по реализации системы передачи пользовательских данных, зашифрованных с применением технологий квантового распределения ключей, а также описание возникших проблем и способы их устранения.

УДК 621.537

Эпитаксиальные слои GaP на сапфире с малыми оптическими потерями для фотонных интегральных схем

Мухин И. С.^{1,2}, Федоров В. В.^{1,2}¹ СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. В

Представлена возможность создания элементов фотонных интегральных схем (ФИС) на основе полупроводниковых гетероструктур на основе слоев фосфида галлия (GaP) на диэлектрических подложках сапфира. Показано, что эпитаксиально-ориентированные слои GaP с высоким оптическим качеством могут быть выращены на прозрачных диэлектрических подложках сапфира методом молекулярно-лучевой эпитаксии, что упрощает технологический процесс и снижает оптические потери. Оптические потери в выращенных слоях крайне низки ($k < 0,02$) в диапазоне длин волн 550–1700 нм. Полученные результаты демонстрируют возможность масштабируемого производства ФИС на основе GaP-на-сапфире.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; A^3B^5 ; гетероструктуры; молекулярно-пучковая эпитаксия; полупроводник на изоляторе; эпитаксиальная стабилизация; нелинейная оптика.

Одним из перспективных путей развития современной фотоники является создание интегральных фотонных схем (ФИС), где на оптических компонентах могут быть реализованы устройства преобразования и обработки сигналов, а также логические элементы. Перспективными материалами для создания подобных устройств являются гетероструктуры полупроводниковых соединений A^3B^5 — основного материала для создания эффективных светоизлучающих и фотопреобразующих элементов для оптоэлектроники [1]. Высокое значение показателя оптического преломления и электрооптические свойства A^3B^5 соединений делают возможным создание на их основе и других элементов ФИС: волноводов, линий задержки и электрооптических модуляторов [2]. Однако, в большинстве современных технологий для формирования A^3B^5 гетероструктур применяются решеточно-согласованные полупроводниковые подложки (GaAs, InP, Si и др.), обладающие значениями показателя преломления близкими к показателю преломления самой гетероструктуры — в результате, оптическое излучение может беспрепятственно распространяться в подложку, что ведет к высоким оптическим потерям. Поэтому, при создании функциональных элементов ФИС слои гетероструктуры либо выращиваются на поверхности предварительно синтезированного многослойного распределенного Брэгговского отражателя, или переносятся на оптически контрастную подложку-носитель, что существенно усложняет ростовую и пост-ростовую технологии [3, 4].

Среди множества соединений A^3B^5 , фосфид галлия (GaP) выделяется широким диапазоном прозрачности (0,5–11 мкм) и выраженной нелинейно-оптической восприимчивостью ($\chi^{(2)} \approx 70$ пм/В для длины волны 1 мкм), что обуславливает интерес к его применению в нелинейной фотонике [5, 6]. В работе показано,

что эпитаксиально-ориентированные слои GaP с высоким оптическим качеством могут быть выращены непосредственно на прозрачных диэлектрических подложках сапфира $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии (рис. 1а). Установлено, что, несмотря на несоответствие симметрии и параметров решетки, посредством разработанной двухступенчатой техники роста возможно реализовать гетероэпитаксиальный рост слоев GaP-на-сапфире по механизму эпитаксии с доменным согласованием [7]. Так, на поверхности $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ становится возможен рост эпитаксиально ориентированной пленки GaP (111), где каждая пятая атомная плоскость решетки GaP на границе пленка/подложка совпадает с каждой четвертой плоскостью решетки Al_2O_3 с точностью $(\Delta a/a)$ 1 %.

Кристаллографическая ориентация пленки и ее структурное совершенство были подтверждены методом рентгеновской дифрактометрии в режиме картирования обратного пространства. Формирование атомно-резкого гетероинтерфейса было подтверждено наблюдениями просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Исследование поверхности эпитаксиальных слоев методом атомно-силовой микроскопии (AFM) показало, что предложенная ростовая методика позволяет формировать атомно-гладкие слои GaP с среднеквадратичной шероховатостью поверхности менее 3 нм.

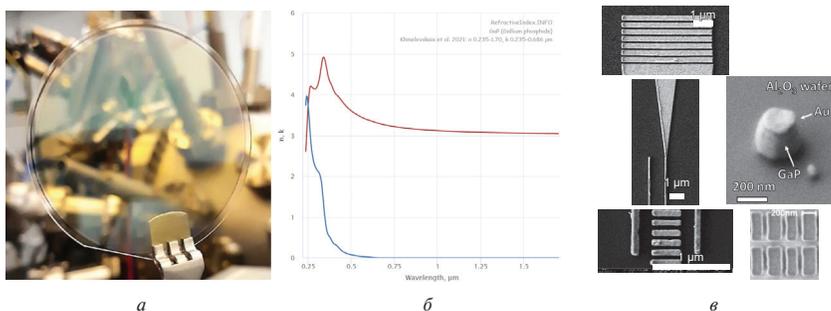


Рис. 1. а) Эпитаксиальная пленка GaP толщиной 200 нм, выращенная на прозрачной подложке сапфира; б) Спектральные зависимости оптических характеристик; в) СЭМ изображение наноструктур GaP-на-сапфире, изготовленные методом электронной литографии и травления

Измерение комплексного показателя преломления слоев GaP-на-сапфире методом спектральной эллипсометрии в видимом и ближнем ИК-диапазоне показали, что оптические константы эпитаксиальных слоев близки к значениям для объемного GaP, а оптические потери низки (рис. 1б) [8]. Показано, что применение методов электронной литографии и реактивного ионного травления в индуктивно связанной хлорной плазме позволяет формировать на основе GaP-на-сапфире как высокодобротные диэлектрические наноструктуры поддерживающие оптические резонансы, так и функциональные элементы будущих ФИС (рис. 1в).

Литература

1. Roelkens G. et al. III-V/silicon photonics for on-chip and intra-chip optical interconnects // *Laser Photonics Rev.*, 2010. Vol. 4. № 6. P. 751–779.

2. Martin A., Combr e S., de Rossi A., Beaudoin G., Sagnes I. and Raineri F. Nonlinear gallium phosphide nanoscale photonics // *Photonics Res.*, 2018. Vol. 6. № 5. P. B43.
3. Demeester P., Pollentier I., De Dobbelaere P., Brys C. and Van Daele P. Epitaxial lift-off and its applications // *Semicond. Sci. Technol.*, 1993. Vol. 8. № 6. P. 1124–1135.
4. Anthur A. P. et al. Continuous Wave Second Harmonic Generation Enabled by Quasi-Bound States in the Continuum on Gallium Phosphide Metasurfaces // *Nano Lett.*, 2020. Vol. 20. № 12. P. 8745–8751.
5. Tassev V. et al. Progress in orientation-patterned GaP for next-generation nonlinear optical devices // *Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XII*, 2013. Vol. 8604. P. 86040V.
6. Parsons D. F. and Coleman P. D. Far Infrared Optical Constants of Gallium Phosphide // *Appl. Opt.*, Jul. 1971. Vol. 10. № 7. P. 1683_1.
7. Narayan J. and Larson B. C. Domain epitaxy: A unified paradigm for thin film growth // *J. Appl. Phys.*, 2003. Vol. 93. № 1. P. 278–285.
8. Khmelevskaia D., Markina D. I., Fedorov V. V., Ermolaev G. A., Arsenin A. V., Volkov V. S., Goltaev A. S., Zadiranov Yu. M., Tzibizov I. A., Pushkarev A. P., Samusev A. K., Shcherbakov A. A., Belov P. A., Mukhin I. S., Makarov S. V. Directly grown crystalline gallium phosphide on sapphire for nonlinear all-dielectric nanophotonics // *Appl. Phys. Lett.*, 2021. Vol. 118. P. 201101.
9. Fedorov V. V., Koval O. Y., Ryabov D. R., Fedina S. V., Eliseev I. E., Kirilenko D. A., ... Mukhin I. S. Nanoscale Gallium Phosphide Epilayers on Sapphire for Low-Loss Visible Nanophotonics // *ACS Appl. N. Mat.*, 2022. Vol. 5. № 7. P. 8846–8858.



УДК 621.3

Фотонные интегральные схемы. Кремниевая фотоника и материалы A^3B^5

Криштон В. Г.^{1,2,3}

¹ АО «ИнфоТекс»

127287, г. Москва, ул. Отрадная 2Б

² Институт проблем технологии микроэлектроники РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна 6

³ Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

vladimir.krishtop@infotecs.ru

В данном докладе преимущества и недостатки фотонных интегральных схем (ФИС) на основе технологий эпитаксиального роста материалов A^3B^5 с точки зрения развития производства в России. Разработка ФИС на A^3B^5 активно ведутся в данный момент, и повышение компетенций в этой области позволяет перескочить добрый десяток лет эволюционного развития индустрии ФИС, и производить конкурентоспособные изделия по самым современным передовым технологиям.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; квантовые коммуникации; квантовое распределение ключей.

Коммерчески доступные в России на данный момент техпроцессы на основе кремниевой технологии (SiO_2 , SOI, Si_3N_4 , SiON...) не позволяют изготавливать интегральные активные элементы. Для этой задачи наиболее подходящими на данный момент выглядят полупроводниковые соединения A^3B^5 . Наиболее развитая технология на основе InP (фосфида индия) требует крайне дорогостоящих импортных подложек. Перспективной выглядит технология эпитаксиального роста слоев GaP на промышленно выпускающихся в России сапфировых подложках. Освоение данных материалов A^3B^5 интересно тем, что по мере развития технологии станет возможно изготавливать интегральные активные элементы ФИС — источники, усилители, смесители. Также материалы A^3B^5 являются прямозонными, имеют высокие показатели оптического преломления, что позволяет достичь меньших планарных размеров при меньших потерях, в сравнении с кремниевой платформой.

Плюсы A^3B^5 : Материалы A^3B^5 — прямозонные полупроводники, что позволит в дальней перспективе выращивать источники излучения и активные элементы на кристалле ФИС, причем как с оптической, так и с электрической накачкой. Также они обладают высокими коэффициентами преломления в оптическом диапазоне, в результате линейные размеры элементов на A^3B^5 в разы меньше, чем в кремниевой фотонике. Из-за этого меньше погонные потери в волноводе, на изгибах волновода, и суммарные потери сигнала на изделии.

ФИС на A^3B^5 — это изделия с более высокой степенью интеграции и миниатюризации, с меньшими потерями, выполненные по более передовым и эффективным технологиям. Более компактные конечные устройства, что опять-таки в перспективе дает возможность размещения в малых БАС (беспилотниках) и носимых пользовательских устройствах, таких как мобильные телефоны, часы, планшеты,

автобрелки, документы с чипами, карты доступа и банковские карты, ... вплоть до RFID-меток.

Минусы A^3B^5 : отсутствие готовых производственных площадок, оснащенных оборудованием для A^3B^5 , необходимость закупать или (лучше) разрабатывать технологическое оборудование для промышленного производства. Более высокая цена изделия по сравнению с кремниевой фотоникой.

Разработки ФИС на A^3B^5 в интегральной фотонике активно ведутся в данный момент, и повышение компетенций в этой области дает возможности развития самых современных разработок по ФИС. Это позволяет перескочить добрый десяток лет эволюционного развития индустрии ФИС, резко сократить технологическое отставание, и включиться в самую передовую гонку как равноправный соперник, а не на правах догоняющего.



УДК 535.14

Применение фотонных интегральных схем в квантовой коммуникации на боковых частотах

к. ф.-м. н. Киселёв Ф. Д.^{1,2}, к. ф.-м. н. Самсонов Э. О.^{1,2}, к. т. н. Чистяков В. В.², Казаков И. А.³, д. ф.-м. н. Шипулин А. В.³, д. ф.-м. н. Дорожкин П. С.³, к. ф.-м. н. Егоров В. И.^{1,2}

¹ ООО «СМАРТС-Кванттелеком»

199178, г. Санкт-Петербург, В.О., б. линия, 59, корп. 1, лит. Б, пом. 17/6
info@quantilecom.ru

² Национальный исследовательский университет ИТМО

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А

³ Сколковский институт науки и технологий

121205, г. Москва, Территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1

Выполнено моделирование и макетирование системы квантовой коммуникации на боковых частотах модулированного излучения (КРКБЧ) с применением фотонных интегральных схем (ФИС) для осуществления фазовой и амплитудной модуляции в модуле отправителя.

Ключевые слова: квантовая коммуникация; квантовое распределение ключей; фотонные интегральные схемы.

Системы квантового распределения ключей (КРК) в настоящее время находятся на стадии активного внедрения. В связи с этим остро встают вопросы об их миниатюризации, снижении их стоимости при массовом производстве, повышении стабильности оптической схемы в реальных условиях эксплуатации. Все эти задачи могут быть решены при переходе от волоконно-оптических схем КРК к применению фотонных интегральных схем (ФИС) [1].

Известен подход к КРК, основанный на применении модуляции излучения на боковых частотах оптического спектра (КРКБЧ) [2]. Такие системы получили применение и в магистральных, и в городских квантовых сетях. Они обладают высокой стабильностью в условиях реальных линий связи, могут применяться для передачи квантовых сигналов как по оптическому волокну, так и по воздуху, а также реализовывать разные протоколы КРК. В системах КРКБЧ для реализации протокола квантовой передачи применяются амплитудные и фазовые модуляторы.

В данной работе выполнено моделирование электрооптических модуляторов, основанных на интерферометре Маха—Цендера и изготовленных на базе фотонных интегральных схем (ФИС), в системе КРКБЧ. Проведено макетирование модуля отправителя КРКБЧ с амплитудным и фазовым модуляторами, изготовленными на ФИС по технологии «кремний на изоляторе» (SOI).

Литература

1. Sibson P., Erven C., Godfrey M. et al. Chip-based quantum key distribution // Nat Commun., 2017. 8, 13984.
2. Kiselev F. et al. A theoretical study of subcarrier-wave quantum key distribution system integration with an optical transport network utilizing dense wavelength division multiplexing // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2021. 54 135502.

УДК 535.14, 530.145

Определение секретного ключа в квантовой коммуникации с учетом побочных каналов

Сыч Д. В.

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

denis.sych@gmail.com

Рассмотрены различные подходы к определению секретного ключа в квантовой коммуникации и способы его расчета. Показано, что учет побочных каналов в реалистичной модели системы квантовой коммуникации приводит к компрометации ключа, определенного для идеализированного случая без побочных каналов. Обсуждаются возможные модификации секретного квантового ключа и протоколов его безопасного распределения.

Ключевые слова: квантовое распределение ключа; секретный ключ; уязвимость; информационная безопасность; побочные каналы.

Введение

Квантовое распределение ключа (КРК) — одно из основных направлений квантовой коммуникации, нацеленное на информационно-безопасную коммуникацию между удаленными пользователями. Целью КРК является выработка секретного ключа, известного только легитимным пользователям. Для некоторых протоколов КРК существуют математически строгие доказательства безопасности, гарантирующие отсутствие информации о секретном ключе у любых третьих сторон.

Уязвимости в реальных системах КРК

Практические реализации протоколов КРК в виде программно-аппаратного комплекса имеют ряд уязвимостей, связанных как с неточным соответствием конкретной инженерной реализации выбранному теоретическому протоколу КРК, так и с неучтенными эффектами функционирования аппаратуры. Подобные неидеальности и несоответствия между практической реализацией и теоретической моделью приводят к успешному взлому системы КРК [1].

Побочные каналы

Наиболее проблематичным классом уязвимостей, для которого не существует общего решения на данный момент, являются *побочные каналы* — отклонения в функционировании системы КРК вне операционной степени свободы. Проблема связана с тем, что секретный ключ в КРК является не измеряемой характеристикой, а вычисляемой на основе модельного описания. Доказательства безопасности КРК, на основе которых вычисляется ключ, всегда проводятся исключительно в рамках некоторой теоретической модели, описывающей конкретный протокол КРК. Несовпадение между теоретической моделью и реальной реализацией КРК приводит к неприменимости доказательств безопасности.

Секретный ключ с учетом побочных каналов

Возможным подходом к решению данной проблемы является расширение модельного описания, более полно учитывающего конкретную реализацию. Как мы показываем, такой подход не исключает появление новых уязвимостей, и не может



быть использован на практике. Другим вариантом решения, предлагаемым нами, является более корректное определение секретного ключа, вырабатываемого в КРК, в котором учтена специфика аппаратных реализаций и их возможное несоответствие теоретическому протоколу.

А именно, мы проводим классификацию существующих подходов к определению секретного ключа в КРК, и показываем границы их применимости и классы уязвимостей, связанных с разными определениями секретного ключа. Также мы приводим оценку возможных отклонений в функционировании компонентной базы для аппаратной реализации КРК. На основе этого, мы показываем возможности компроментирования ключа в КРК согласно существующим его определениям. Далее, мы предлагаем несколько вариантов переопределения ключа, для которых рассмотренные проблемы снимаются. В частности, мы рассматриваем пассивные побочные каналы в источнике света [2] и на данном примере показываем применимость нашего подхода.

Заключение

Существующие определения и подходы к расчету секретного ключа в КРК могут приводить к компроментации секретного ключа, вырабатываемого в реальной системе КРК. Для решения данной проблемы целесообразно более аккуратно определять как секретный ключ, так и условия его генерации.

Литература

1. Lydersen L. et al. Hacking commercial quantum cryptography systems by tailored bright illumination // *Nat. Photonics*, 2010. Vol. 4. P. 686–689.
2. Duplinskiy A. et al. Bounding passive light-source side channels in quantum key distribution via Hong-Ou-Mandel interference // *Phys. Rev. A*, 2021. Vol. 104. P. 012601.

УДК 53.02

Об управлении взаимодействующими с окружением кубитами и о стойкости протоколов КРК в условиях затухания

Печень А. Н.^{1,2,3}¹ Математический институт им. В. А. Стеклова РАН

119991, г. Москва, ул. Губкина, 8

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

³ Институт системного программирования им. В. П. Иванникова РАН

109004, г. Москва, ул. Александра Солженицына, 25

В докладе мы расскажем о некоторых строгих математических результатах в области управления взаимодействующими с окружением кубитами, включая разработку методов оптимизации, построение оптимальных управлений и т. д. В области квантовых коммуникаций отметим важную задачу построения верхних оценок стойкости для протоколов КРК.

Ключевые слова: управление квантовыми системами; протоколы КРК.

Методы оптимизации и управления квантовыми системами имеют важное значение для квантовых технологий [1]. Большой интерес к таким методам связан с потребностями наиболее эффективного создания квантовых состояний или генерации квантовых операций для квантовых вычислительных устройств и систем квантовых коммуникаций, в том числе при наличии шумов, окружения, неоднородностей и т. п.

Для решения задач оптимизации для открытых квантовых систем нами разработана модификация incoherent Gradient Ascent Pulse Engineering (inGRAPE) метода GRAPE, включающая некогерентное управление [2]. При этом были получены аналитические выражения для градиентов различных целевых функционалов, что позволяет существенно упростить численную оптимизацию. Также получено аналитическое решение для случая одного взаимодействующего с окружением кубита. Метод inGRAPE был затем применен к задаче оптимальной генерации двухкубитных квантовых вентилях в открытых квантовых системах [3]. Одной из важных задач квантового управления является задача оптимального быстрогодействия, связанная с построением управлений, позволяющих достичь заданной цели оптимизации за минимально возможное время. Нами эта задача решена аналитически для случая одного кубита [4]. Строго найдены нижняя и верхняя границы для задачи перевода заданного начального состояния в целевое конечное. Установлено, что оптимальные управления имеют весьма специальную форму — они включают импульсы в начале и в конце, и могут иметь гладкое поведение в промежутке между этими импульсами.

Методы оптимизации преобразований квантовых систем и оптимального манипулирования квантовыми системами играют важную роль в области квантовых коммуникаций, где одной из ключевых математических задач является получение доказательств стойкости для практически применяемых протоколов КРК. Построение таких доказательств нередко является сложной задачей, и они имеются не для каждого протокола и не для каждой модели оборудования. Поэтому важную роль приобретает разработка методики быстрой оценки стойкости протоколов

КРК против ряда атак, особенно в условиях затухания, так как именно при потерях в канале связи перехватчик получает новые возможности, связанные с применением постселективных преобразований.

Литература

1. Koch C., Boscain U., Calarco T., Dirr G., Filipp S., Glaser S., Kosloff R., Montanero S., Schulte-Herbrueggen T., Sugny D. and Wilhelm F. Quantum optimal control in quantum technologies. Strategic report on current status, visions and goals for research in Europe // EPJ Quantum Technology, 2022. № 9. P. 19.
2. Petruhanov V.N., Pechen A.N. GRAPE optimization for open quantum systems with time-dependent decoherence rates driven by coherent and incoherent controls // Journal of Physics A, 2023. № 56. P. 305303.
3. Pechen A.N., Petruhanov V.N., Morzhin O.V., Volkov B.O. Control landscapes for high-fidelity generation of C-NOT and C-PHASE gates with coherent and environmental driving // The European Physical Journal Plus, 2024. № 139 P. 411.
4. Lokutsievskiy L.V., Pechen A.N., Zelikin M.I., Time-optimal state transfer for an open qubit // Journal of Physics A, 2024. № 57. P. 275302.

УДК 621.383.523

Лавинные фотодиоды для однофотонных детекторов спектральной области 1,55 мкм

Воропаев К. О.¹, Воропаева И. О.¹, Варфаламеева С. В.¹, Блохин С. А.², Новиков И. И.³, Андрушкин В. В.³, Устинов В. М.⁴, Карачинский Л. Я.³

¹ АО «ОКБ-Планета»

173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. И
voropaevko@okbplaneta.ru

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

³ ООО «Коннектор Оптикс»

194292, г. Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16, лит. Б

⁴ НТЦ микроэлектроники РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Представлены результаты создания и исследования лавинных фотодиодов, предназначенных для детектирования одиночных фотонов в спектральной области 1,55 мкм. Изготовленные приборы демонстрируют субнаноамперные темновые токи при комнатной температуре и менее 10 пА при температуре -60°C .

Ключевые слова: однофотонный лавинный фотодиод; квантовая криптография; однофотонный детектор.

Лавинные фотодиоды являются высокочувствительными полупроводниковыми приборами, преобразующими свет в электрический сигнал за счет фотоэффекта. В настоящее время известны различные устройства и методы детектирования одиночных фотонов, одним из которых являются однофотонные детекторы на базе однофотонных лавинных фотодиодов (ОЛФД) [1]. Данные приборы все чаще используются в таких областях, как квантовая криптография в составе оборудования квантового распределения ключей. Условия применения ОЛФД в таких изделиях характеризуется особым режимом работы. При значении напряжении меньшем, чем напряжение пробоя $U_{пр}$, усиление ОЛФД изменяется пропорционально приложенному напряжению и остается конечным, а при напряжении, большем чем $U_{проб}$, возникает вероятность возникновения лавинного (бесконечного) усиления в результате поглощения лишь одного фотона. Такой режим, позволяющий эффективно регистрировать одиночные фотоны, называется режимом Гейгера. Гейгеровский режим работы при таком высоком коэффициенте усиления неизбежно приводит к очень высокому значению тока, протекающего в ОЛФД. Схемы активного стробирования повышают и понижают напряжение с высокой частотой, переводя тем самым ОЛФД в режим Гейгера на короткий промежуток времени, что позволяет осуществлять корректное детектирование фотона.

Для практической реализации ОЛФД, была выбрана планарная конструкция на базе системы материалов InAlGaAsP/InP с разделными областями поглощения фотонов в слое InGaAs и умножения фотогенерированных носителей заряда в слое InP , и охранным кольцом для предотвращения краевого пробоя [2]. Области с заданной глубиной и профилем распределения примеси р-типа были сформированы с помощью локальной диффузии Zn из металлоорганического источника на основе диэтилцинка через диэлектрическую маску SiO_2 . Толщина слоя умножения $i\text{-InP}$



и уровень легирования зарядового слоя p-InP выбирался таким образом, чтобы обеспечить напряженность поля на уровне, достаточном для эффективного умножения носителей заряда, при этом стремятся сохранить уровень напряженности поля в поглощающем слое InGaAs ниже $1,5 \cdot 10^5$ В/см для минимизации темнового тока, обусловленного различными механизмами туннелирования носителей в сильных полях [3]. В конструкцию ОЛФД введен поверхностный слой InGaAs для получения омического р-контакта к слоям InP:Zn [4].

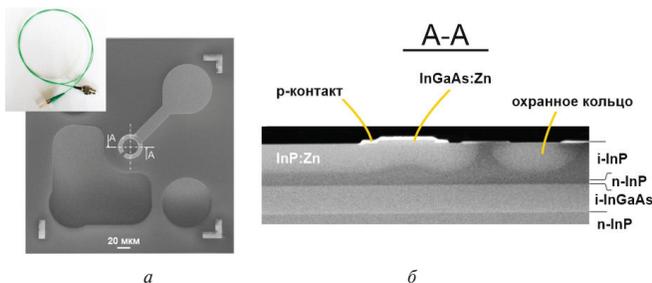


Рис. 1. Изображения изготовленного ОЛФД, полученное с помощью электронной микроскопии: *а)* вид сверху, на вставке фотография ОЛФД в корпусе; *б)* поперечное сечение в рабочей области ОЛФД

Одним из основных параметров однофотонных детекторов является скорость темнового счета, что напрямую связано с темновым током используемого ОЛФД. Как правило, для снижения уровня темновых токов и соответственно темновых отсчетов в режиме счета фотонов ОЛФД охлаждаются до температур -50°C и ниже. Изготовленные ОЛФД при комнатной температуре демонстрируют: пробивные напряжения на уровне 55 В, темновые токи не более 0,5 нА при уровне напряжения $0,9U_{\text{пр}}$, спектральную чувствительность не менее 0,7 А/Вт ($M = 1$), емкость 0,55 пФ при уровне напряжения $0,9U_{\text{пр}}$. Рекомендуемая температура для работы в режиме счета фотонов -60°C .

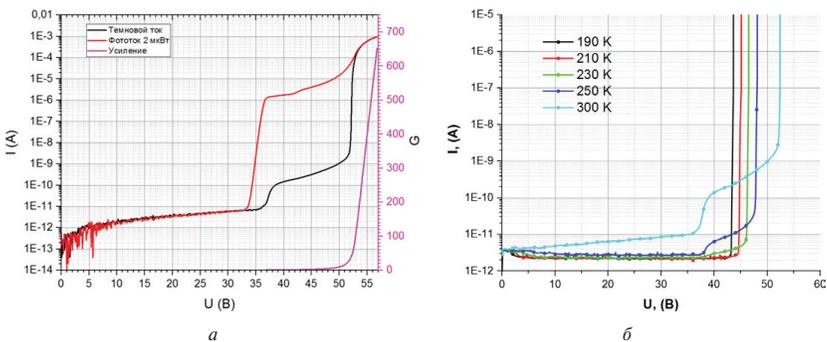


Рис. 2. Характеристики полученных ОЛФД: *а)* вольт-амперная характеристика и усиление, *б)* вольт-амперная характеристика при пониженной температуре

Оценка характеристик изготовленных ОЛФД демонстрирует перспективность применения данных приборов в составе однофотонных детекторов. Авторы благодарят ОАО «РЖД» за финансовую поддержку.

Литература

1. Liang Y., Zeng H. P. Single-photon detection and its applications // SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2014. Vol. 57. № 7. P. 1218–1232.
2. Wenjuan Wang, Huidan Qu et al. InGaAsP/InP single photon avalanche diodes with ultra-high photon detection efficiency // Optical and Quantum Electronics, 2020. 52:299. P. 299.
3. Forrest S. R., Didomenico M., Smith R. G., Stocker H. J. Evidence for tunneling in reverse-biased III-V photodetector diodes // Applied Physics Letters, 1980. Vol. 3. № 7. P. 580–582.
4. Blokhin S. A., Voropaev K. O. et al. Surface morphology of InGaAs and InP layers after local Zn diffusion from the vapor phase in the MOCVD reactor // Materials Physics and Mechanics, 2023. 51 (5).



УДК 621.382.2/.3

Фотоэлектронные умножители для детектирования группированных фотонов

Попов В. Г.^{1,2,3}¹ АО «ИнфоТеКС»

127273, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б, стр. 1

² Отдел радио-фотоники, НТЦ Телекоммуникаций,

Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ Факультет информационных технологий и анализа больших данных,

Финансового университета при правительстве РФ

109456, г. Москва, 4-й Вешняковский проезд, 4

В докладе теоретически рассматривается взаимодействие группированных фотонов, то есть группы фотонов в одном квантовом состоянии поля с однофотонными детекторами и детекторами с разрешением по числу фотонов. Показано, что использование матрицы однофотонных детекторов не в состоянии разрешать число фотонов в таких состояниях. В тоже время использование фотоумножителей в виде вакуумных трубок с диодами позволяет разрешить число фотонов в таких состояниях со значительно большей эффективностью. Так же в докладе будут обсуждаться повышение эффективности таких фотоумножителей и перспективы применения групповых состояний фотонов для квантового распределения ключей (КРК).

Ключевые слова: фотоэлектронные умножители; групповые состояния фотонов; однофотонные детекторы.

Развитие квантовых коммуникаций выдвигает высокие требования к детекторам квантовых состояний фотонов и томографии их квантовых состояний. При этом как правило многофотонные состояния рассматриваются как нежелательные для использования в квантовом распределении ключей, вследствие возможной атаки с разделением по числу фотонов. Исключения составляют запутанные многофотонные состояния, поскольку они обладают нелокальной волновой функцией, которая не позволяет расщепить фотоны независимым образом [1]. Однако, существуют и другие состояния не подверженные или слабо подверженные такому расщеплению, это групповые фотоны или фотоны в одном квантованном состоянии электромагнитного поля. Сложность расщепления таких состояний определяется тем, что многофотонное Фоковское состояние $|n\rangle$, где n — число фотонов имеет энергию $E_n = (n + 1/2)\hbar\omega$. При попытке расщепить такое состояние при помощи сплиттера, мы, например, не можем получить состояние $|n_1\rangle|n_2\rangle$, поскольку это состояние имеет другую энергию $(n + 1/2 \neq n_1 + n_2 + 1)$. Групповое состояние $|n\rangle$ можно расщепить при помощи детектора, который может поглотить часть фотонов, но при этом произойдет неизбежное изменение группового состояния оставшихся фотонов. Есть еще вариант взаимодействия с вакуумным состоянием, но и здесь необходимо согласовывать параметры вакуумного состояния с групповым, которое заранее может быть неизвестно. Такие групповые состояния в принципе можно использовать для КРК и они способны существенно увеличить дальность. Но для

создания таких состояний надо разрабатывать специальные источники и это тема отдельного исследования, а также стандартные подходы, связанные с однофотонными детекторами здесь не всегда работают, что и будет обсуждаться в докладе.

Гарантией доверенной доставки ключа при КРК является тот факт, что информация кодируется в квантовых состояниях фотонов, которые при внешнем воздействии могут измениться, что приведет к ошибкам при формировании симметричного ключа. Создать источник неразличимых и неразделимых фотонов на сегодняшний день проблематично, поэтому используют ослабленные лазеры, в которых создаются, как правило, когерентные состояния содержащие смесь группированных состояний [2]. Ослабление таких источников делают достаточно большим, чтобы избежать проникновения смешанных, а значит разделимых состояний в канал связи. При этом количество фотонов в импульсах излучения обычно мало не более 1. Для измерения таких малых мощностей используют однофотонные детекторы и технология импульсной синхронизации таких детекторов с фотонными импульсами (здесь я буду рассматривать дискретные квантовые протоколы [1]). Параметры детекторов существенно влияют на скорость формирования или выработки квантового ключа, допустимые для надежной выработки дальность или затухание в канале связи. Для обнаружения многофотонных импульсов используют матрицы детекторов и количество фотонов определяют по количеству сработавших детекторов. Очевидно, что такой подход хорошо работает на смешанных состояниях или разделяемых состояниях, но будет неприменим для группированных состояний. Для исследования группированных состояний мы предлагаем использовать фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Сигнал ФЭУ напрямую пропорционален количеству поглощенных фотонов, поскольку коэффициент умножения строго задается количеством динодов ФЭУ и параметрами их покрытий. Проблемой ФЭУ является их низкая квантовая эффективность [4], которую можно повышать оптимизируя, например, фоточувствительный катод. В качестве методов оптимизации предлагается использовать наноструктурированный катод с фоточувствительными нановискерами.

Литература

1. Pirandola S., Andersen U. L., Banchi L., Berta M., Bunandar D., Colbeck R., Englund D., Gehring T., Lupo C., Ottaviani C., Pereira J. L. et al. Advances in quantum cryptography // *Advances in Optics and Photonics*, 2020. 12. P. 1012–1236. arXiv:1906.01645 (2020).
2. Hanamura E., Kawabe Y., Yamanaka A. *Quantum nonlinear optics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. P. 9.
3. Eisaman M. D. et al. Invited review article: Single-photon sources and detectors // *Review of scientific instruments*, 2011. 82 p. 071101.



УДК 681.518

Физические датчики случайных чисел. Особенности квантовых генераторов случайных чисел

Науменко А. П.^{1,2,3}¹ ООО «СФБ Лаб»

127273, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б, стр. 1

² АО «ИнфоТеКС»

127273, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б, стр. 1

³ АНО ИТЦ ЦК

119607, г. Москва, Раменский бульвар, 1

В докладе рассмотрены основные принципы построения и сферы использования физических генераторов случайных чисел. Особый акцент сделан на выделении принципиальных особенностей генераторов случайных чисел, использующих квантовые принципы, дана краткая классификация указанных принципов, которые по мнению авторов должна учитываться при разработке квантового генератора как коммерческого изделия.

Ключевые слова: случайные числа; физические генераторы случайных чисел; квантовые генераторы случайных чисел; криптография.

Во многих фундаментальных и прикладных задачах, возникающих в научной работе и в промышленных приложениях ее результатов, естественным образом возникает потребность в использовании случайных чисел. В этой связи актуальна задача разработки специальных устройств, которые призваны удовлетворять указанную потребность.

Наданный момент известно множество подходов к построению таких устройств (в том числе, являющихся не программно-аппаратным, а полностью программным изделием). Принципиально, их можно разделить на физические генераторы (часто их также называют — датчики, ФДСЧ) случайных чисел, программные генераторы случайных чисел (по аналогии — ПДСЧ) и гибридные варианты (в частности, так называемые биологические датчики случайных чисел, БиоДСЧ, работа которых использует активное взаимодействие человека-оператора и некоторого технического приспособления).

В настоящем докладе мы сконцентрируем свое внимание на криптографических приложениях генераторов случайных чисел. Данные приложения также весьма многообразны: от создания собственно криптографических ключей, которые непосредственно используются при шифровании информации, до случайного выбора базиса при реализации квантово криптографического протокола или построения распределений специального вида в целях повышения характеристик постквантовых криптографических механизмов.

Однако, в большинстве ситуаций мы стремимся к построению полностью *недетерминированного* источника случайных чисел и только его готовы считать *истинно* случайным (отмечу, что оба понятия выделенные курсивом имеют с точки зрения практических задач общефилософский смысл, вызывают массу дискуссий и строго показаны быть не могут). Здесь использование различных физических процессов, которые можно считать независимыми от своего предыдущего состояния (с точностью до адекватных решаемой задаче условий), является предпочтительным

(в сравнении, например, с программной генерацией случайных чисел из заранее определенного числа).

Выбор конкретного физического процесса в качестве основы для ФДСЧ может зависеть от множества факторов, в том числе экономического свойства. Однако, в любом случае, при использовании в криптографических задачах должно быть оценено качество случайных чисел, которые вырабатываются, а также важны эксплуатационные характеристики изделия. С точки зрения двух указанных факторов использование квантовых принципов выглядит весьма привлекательно.

Отдельно следует отметить, что использование криптографических методов защиты информации в нашей стране регулируется, государственным регулятором в данной сфере является ФСБ России. Соответственно, по аналогии с СКЗИ, разработанные ФДСЧ должны проходить тематические исследования на соответствие требованиям Регулятора.

Основной задачей в рамках указанных исследований является построение математической модели физического процесса, выбранного в качестве основы ФДСЧ, оценка соответствия конкретной технической реализации изделия указанной модели и подтверждение с использованием статистических экспериментов достаточного качества случайных чисел, которые ФДСЧ вырабатывает.

Литература

1. Приказ ФСБ РФ от 9 февраля 2005 г. № 66 «Об утверждении Положения о разработке, производстве, реализации и эксплуатации шифровальных (криптографических) средств защиты информации».
2. Принципы разработки и модернизации шифровальных (криптографических) средств защиты информации Р 1323565.1.012-2017.

УДК 535.14

Текущий опыт и перспективы практического развития технологии квантового распределения ключей

Алексеев А.Л.

ООО «СМАРТС-Кванттелеком»

199178, г. Санкт-Петербург, В.О., б. линия, 59, корп. 1, лит. Б, пом. 17/6

info@quanttelecom.ru

Компания «СМАРТС-Кванттелеком» проводит исследования, ведет прикладные разработки, создает решения в области квантовых коммуникаций для защиты данных с помощью решений, основанных на законах квантовой физики. В настоящий момент большое внимание уделяется совершенствованию систем квантового распределения ключей, модулей атмосферной передачи квантовых сигналов, их миниатюризации и интеграция на подвижные объекты. Ведется работа над новой линией продуктов компании.

Ключевые слова: квантовая коммуникация; квантовое распределение ключей.

В докладе будут затронуты:

- история развития решений компании в кооперации с Университетом ИТМО. Коротко в хронологии от 2006 года по настоящее время;
- поколения систем КРК на боковых частотах. Как выглядели системы КРК еще в недавнем прошлом;
- основные продукты компании и решение для построения квантовых сетей произвольной топологии:
 - для магистральных квантовых сетей,
 - для защиты выделенных каналов связи,
 - о текущих разработках компании;
- как развивалась компонентная база. Про импортозамещение и создание устройств нового поколения: детектор одиночных фотонов, амплитудный и фазовый модуляторы;
- о преимуществах и перспективных направлениях работы компании на ближайшее время;
- о достижениях компании;
- об испытаниях на TEA NEXT, совместно с ПАО «Ростелеком» и ООО «Атлас». Про тесты с волокном;
- услуги на базе квантовых сетей. Перспективы развития сервисов с использованием квантовых ключей;
- основные подходы к обеспечению надежности квантовых сетей;
- куда двигаться дальше и в каких сферах будет развиваться технология.

УДК 004.9

Разработка стационарной системы формирования защищенных каналов связи между бортовыми устройствами, расположенными на подвижном составе, и системами управления железнодорожным транспортом

Галдин А. А., Андрианов В. Б.

*АО «НИИАС», заместитель генерального директора
109029, г. Москва, ул. Нижегородская, 27, стр. 1
A.Galdin@vniias.ru, V.Andrianov@vniias.ru*

Рассмотрены перспективы развития систем квантового распределения ключей для построения магистральных и локальных квантовых сетей смешанной топологии. Обсуждаются вопросы, связанные с модернизацией методов управления ключами в средствах криптографической защиты информации, распределяющих квантовозащищенные ключи. Предложены направления для модернизации инфраструктуры квантовых сетей.

Ключевые слова: квантовые технологии; квантовое распределение ключей; железнодорожная инфраструктура; информационная безопасность.

В настоящее время, с учетом имеющихся рисков и постоянно растущих угроз реализации компьютерных атак и иных информационных угроз безопасности информации, достижение целей деятельности и непрерывности бизнес-процессов в ОАО «РЖД» невозможно без обеспечения требуемого уровня защиты для объектов информационной инфраструктуры ОАО «РЖД» и каналов связи между ними. Для защиты каналов связи используются криптографические методы защиты. Однако в условиях значительного числа субъектов и объектов управления остро стоит задача формирования и распределения ключевой информации. Для ее решения целесообразно использовать технологию квантового распределения ключей (КРК), позволяющей формировать ключи для средств криптографической информации автоматически на технических средствах субъектов и объектов управления без применения каких-либо других механизмов их распределения.

Атмосферные каналы связи в системах КРК позволяют решать проблему «последней мили», когда при строительстве квантовых сетей на отдельном участке нет возможности обеспечить связь по оптическому волокну. В мировой практике известны примеры реализации систем, позволяющих обеспечивать квантовую рассылку ключей между наземными базовыми станциями и автомобилями, самолетами, грузовыми дронами и космическими спутниками. перечисленными подвижными объектами, но проектов интеграции технологии КРК с подвижными железнодорожными объектами представлено не было.

Уникальность данной работы заключается в интеграции технологии КРК через оптические атмосферные каналы связи с подвижными объектами железнодорожного транспорта, а полученные в ходе ее выполнения результаты позволят сделать вывод о наличии принципиальной возможности интеграции атмосферных оптических каналов квантовой связи в инфраструктуру беспилотного движения электропоездов.

Литература

1. Галдин А. А., Корольков А. В., Дудник С. Я., Юров И. А. Квантовые технологии для ОАО «РЖД». От теории к практике // Автоматика, связь, информатика, 2021. — № 11. — С. 51–54.
2. Матюхин В. Г., Галдин А. А., Глейм А. В., Смирнов К. В., Сысоев Д. А., Дудник С. Я., Юров И. А. Способы внедрения технологии квантового распределения ключей в системах управления движением // Автоматика, связь, информатика, 2023. — № 7. — С. 19–22.

УДК 004.735:530.145:003.26

Принципы сопряжения сетей квантового распределения ключей, построенных на оборудовании разных производителей

Александров С. В., Герасимова А. Г., Емельянов В. М., Мареева Е. В.

ООО «Системы практической безопасности»

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 22, лит. А

emelyanov@systempb.com

Разработана концепция создания стыковочного узла, обеспечивающего сопряжение сетей квантового распределения ключей в рамках территориально распределенной квантовозащищенной сети связи ОАО «РЖД». Сформулированы требования к оборудованию стыковочного узла, его интерфейсам и протоколам, а также сопрягаемым со стыковочным узлом доверенным промежуточным узлам сетей квантового распределения ключей.

Ключевые слова: квантовозащищенная сеть связи; квантовое распределение ключей; доверенный промежуточный узел; средство криптографической защиты информации; сопряжение сетей; стыковочный узел; ISTOQ-M; ProtoQa.

Современный этап развития квантовых коммуникаций в Российской Федерации связан с созданием территориально распределенных квантовозащищенных сетей связи (КЗСС) [1]. Такие сети в качестве своего компонента должны включать сети квантового распределения ключей (КРК), обеспечивающие формирование и доведение до средств криптографической защиты информации (СКЗИ) потребителей квантово-защищенных ключей (КЗК).

Обеспечение конкурентной среды на рынке квантовых коммуникаций подразумевает использование оборудования различных производителей для создания сетей КРК. В настоящий момент ОАО «РЖД» ведет строительство нескольких участков сетей КРК, которые будут функционировать в интересах единой КЗСС. К сожалению, на сегодняшний день отсутствуют стандартизованные на национальном уровне протоколы формирования, распределения и доведения КЗК между доверенными промежуточными узлами, которые бы обеспечили возможность создания единой сети КРК в масштабе страны. Методические рекомендации ТК26 МР 26.5.003-2023 [2], в рамках которых определена ключевая система ISTOQ-M, в данный момент еще не утверждены. При этом они регламентируют алгоритмы формирования КЗК в оконечных ДПУ, но не протоколы информационного сопряжения ДПУ. Как результат, в настоящее время каждый из существующих производителей оборудования сетей КРК реализует в рамках своего сегмента проприетарные: ключевую систему, протоколы выработки, распределения и доведения КЗК, а также схему адресации. По этой причине для возможности организации информационного обмена в рамках КЗСС между СКЗИ потребителями, подключенными к сетям КРК, построенным на оборудовании различных производителей, актуальной является задача создания стыковочного узла, обеспечивающего информационное сопряжение сетей КРК при выработке, распределении и доведении КЗК до СКЗИ потребителей.

В соответствии с рекомендацией ITU-T Y.3810 [3] при сопряжении сетей КРК используются следующие интерфейсы:

- Qx — интерфейс сопряжения квантового уровня;



- Кх — интерфейс сопряжения уровня управления ключами;
- Сх — интерфейс сопряжения уровня передачи контрольной информации;
- Мх — интерфейс сопряжения уровня передачи управляющей информации.

Рекомендация ИТУ-Т допускает две эталонные модели сопряжения — с использованием пограничных шлюзов (GWN, Gateway Node), когда задействуются все интерфейсы Qх, Кх, Сх, Мх для сопряжения сетей напрямую, а также с использованием выделенного стыковочного узла (IWN, Interworking Node). В последнем случае задействуются только интерфейсы Кх, Сх, Мх, а сопряжение сетей КРК на квантовом уровне не осуществляется.

В докладе будут рассмотрены достоинства и недостатки каждой из моделей сопряжения сетей КРК, представлены предложения по созданию стыковочного узла, обеспечивающего сопряжение существующих и вновь создаваемых сетей КРК ОАО «РЖД» при выработке, распределении и доведении КЗК до СКЗИ потребителей, а также требования к ДПУ, сопрягаемым со стыковочным узлом. Будет рассмотрена возможность использования протокола ProtoQa [4] для передачи КЗК между сетями КРК и перспективы перехода с проприетарных ключевых систем, реализованных в сетях КРК, на ключевую систему ISTOQ-М.

Литература

1. ПНСТ 829-2023. Квантовые коммуникации. Общие положения. — М.: Российский институт стандартизации, 2023.
2. МР 26.5.003-2023. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Ключевая система полносвязной многоарендаторной сети шифрованной связи на базе ККС ВРК с ДПУ. — Проект (вторая редакция). — М.: Технический комитет по стандартизации «Криптографическая защита информации», 2023.
3. Recommendation ITU-T Y.3810 Quantum key distribution network interworking. Framework. ITU-T, 2022.
4. Р 1323565.1.046—2023. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Защищенный протокол взаимодействия квантово-криптографической аппаратуры выработки и распределения ключей и средства криптографической защиты информации. — М.: Технический комитет по стандартизации «Криптографическая защита информации», 2023.

УДК 681.518

Вопросы информационной безопасности квантово-криптографических систем выработки и распределения ключей**Зызыкин А. П., Дворецкий Д. А., к. т. н., Науменко А. П.***ООО «СФБ Лаб»**127273, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б, стр. 1*

В докладе рассмотрены основные проблемы и предложены возможные способы решения угроз информационной безопасности квантово-криптографических систем выработки и распределения ключей в контексте проведения сертификации соответствующих изделий.

Ключевые слова: сертификация ККС ВРК; ККС ВРК; КРК; квантовое распределение ключей.

Квантово-криптографические системы выработки и распределения ключей (ККС ВРК) являются частным случаем систем криптографической защиты информации (СКЗИ). Они должны соответствовать Требованиям, определяемым государственным регулятором в сфере защиты информации криптографическими средствами — ФСБ России. Кроме того, разработанные системы квантового распределения ключей (КРК) должны проходить полноценные тематические исследования на соответствие этим требованиям. Результаты исследования проходят экспертизу в ФСБ России, по итогам которой готовится Заключение о соответствии Требованиям и возможности эксплуатации, а также Сертификат соответствия. Одной из основных задач обеспечения безопасности ККС ВРК является достижение заданного надежности реализуемых преобразований. Учитывая, что в коммерчески доступных ККС ВРК для построения информационно-квантового канала связи и реализации механизмов защиты от атак на техническую составляющую, как правило используется высокотехнологичная опико-электронная иностранная компонентная база, при построении модели расчета надежностных характеристик данных компонентов требуется проведение отдельных типов исследований каждого компонента.

Для каждого конкретного квантово-криптографического протокола характерны особенности его реализации, которые потенциально могут являться причиной атак. Регулярно появляются новые угрозы для систем КРК, которые требуют реализации в создаваемом оборудовании дополнительных защитных мер. Кроме того, эффективность этих мер должна быть подвергнута проверке при проведении тематических исследований.

Объем и логика тематических исследований ККС ВРК могут несколько отличаться в зависимости от способа построения квантовой системы, в частности, от способа аутентификации служебного канала квантово-криптографического протокола. Поэтому встает вопрос о необходимости разработки рекомендаций по типовым техническим мерам защиты от оптических атак на волоконные системы квантовых коммуникаций с учетом отечественной компонентной базы. Это позволит унифицировать способы защиты от известных, например, оптических атак, и тем самым упростит разработку и проведение тематических исследований ККС ВРК.

Литература

1. Приказ ФСБ РФ от 9 февраля 2005 г. № 66 «Об утверждении Положения о разработке, производстве, реализации и эксплуатации шифровальных (криптографических) средств защиты информации».
2. Принципы разработки и модернизации шифровальных (криптографических) средств защиты информации Р 1323565.1.012-2017.

УДК 535.14

Оптическая квантовая память, основанная на использовании приготовленной долгоживущей спиновой когерентности**Моисеев С. А., Герасимов К. И., Миннегалиев М. М., Моисеев Е. С.***Казанский квантовый центр,**Казанский национальный исследовательский технический университет**им. А. Н. Туполева — КАИ**420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10**s.a.moiseev@kazanqc.org*

Предлагается подход к оптической квантовой памяти на атомном ансамбле, основанный на предварительном создании долгоживущей спиновой квантовой когерентности. Данный подход проанализирован для реализации предлагаемой оптической квантовой памяти на фотонном эхе в кристалле, легированном ионами редкоземельных элементов. На основе проведенного теоретического анализа мы изучаем основные физические свойства изучаемой квантовой памяти и ее отличительные особенности. Среди ключевых отличий этой квантовой памяти отметим возможность восстановления входного сигнала без перевода атомной системы в исходное квантовое состояние, как это имеет место во всех существующих протоколах квантовой памяти на атомных ансамблях. Также отсутствует необходимость применения дополнительных контролирующих лазерных импульсов после поглощения сигнального импульса атомным ансамблем. Сравнивая с AFC протоколом [1], в предлагаемой нами квантовой памяти, вместо создания периодической классической структуры резонансных линий, создается квантовая периодическая структура в виде застывшей макроскопической волны спиновой когерентности с заданным частотным и пространственным периодами.

Мы показываем, что заранее созданная когерентность является дополнительным квантовым ресурсом, использование которого позволяет улучшать основные параметры квантовой памяти, дает возможность ее реализации с естественным неоднородным уширением оптического перехода. Рассматриваются различные сценарии функционирования предлагаемой квантовой памяти, осуществление динамического программирования времени хранения сигнала и восстановление сохраняемых сигнальных световых импульсов в произвольные моменты времени. Мы также обсуждаем кристаллы с редкоземельными ионами, перспективные для реализации предложенной квантовой памяти.

Литература

1. de Riedmatten H., Afzelius M., Staudt M. U., Simon C. and Gisin N. A solid-state light-matter interface at the single-photon level // *Nature*, 2008. 456, 773.

УДК 535.14

Модели квантовых мемристоров на захваченных ионах Yb^+ **Стремоухов С. Ю.^{1,2}, Форш П. А.^{1,2}, Хабарова К. Ю.², Колачевский Н. Н.²**¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1*² *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53
khabarovaky@lebedev.ru*

Обсуждаются концепции реализации квантового мемристора на основе ультрахолодных ионах Yb^+ , захваченных в ловушки Пауля. Анализируются два набора схем уровней иона, отвечающих необходимым значениям времен жизни для реализации мемристивной зависимости населенностей уровней и удобных для осуществления движения населенностей между уровнями за счет резонансного воздействия лазерных полей. Рассматривается также возможность передачи мемристивного состояния по цепочке связанных низкочастотной колебательной модой центра масс ультрахолодных ионов. Предложенные методы создания квантовых мемристоров позволяют создавать многослойные квантовые перцептроны, которые являются основой нейронных сетей.

Термин «мемристор» был введен в начале 1970-х годов. Основное свойство классического мемристора заключается в том, что его сопротивление зависит от протекшего заряда, следовательно, это устройство сохраняет память о прошлых состояниях. Интерес к устройствам подобного рода обусловлен возможностью хранения информации без источника питания и выполнения логических операций [1], а также имитации поведения нейронных синапсов [2]. В настоящее время активно развиваются как классические мемристоры и нейроморфные вычислительные устройства на их основе [3], так и квантовые мемристоры («мемристивное поведение» в которых определяется для математических ожиданий квантовых наблюдаемых) на различных платформах [4].

Недавно нами была предложена реализация квантового мемристора на ультрахолодных ионах [5, 6]. В рамках данной работы обсуждаются концепции квантового мемристора на основе ультрахолодных ионов Yb^+ . Показано, что при определенных значениях параметров лазерных импульсов, которые обеспечивают движение населенности выделенных уровней иона, осуществляется «мемристивная зависимость» выходного сигнала от входного (которыми являются населенность одного из уровней в различные моменты времени, соотнесенные с действием двух лазерных полей). Предложено два варианта создания квантового мемристора: на одиночном ультрахолодном ионе и на цепочке связанных низкочастотной колебательной модой центра масс ультрахолодных ионах. Это делает подобные связанные квантовые мемристоры перспективными с точки зрения использования в нейроморфных вычислениях.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 24-12-00415, <https://rscf.ru/project/24-12-00415>.*

Литература

1. Borghetti J. et al. “Memristive” switches enable “stateful” logic operations via material implication // *Nature*, 2010. Vol. 464. P. 873–876.
2. Alibart F. et al. An organic nanoparticle transistor behaving as a biological spiking synapse // *Adv. Funct. Mater.*, 2010. Vol. 20. P. 330–337.
3. Matsukatova A. N. et al. Scalable nanocomposite parylene-based memristors: Multifilamentary resistive switching and neuromorphic applications // *Nano Res.*, 2023. 16, 3207.
4. Hernani-Morales C. et al. Machine Learning for Maximizing the Memristivity of Single and Coupled Quantum Memristors // *Adv. Quantum Techn.*, 2024. 2300294.
5. Stremoukhov S. et al. Proposal for Trapped-Ion Quantum Memristor // *Entropy*, 2023. Vol. 25. № 8. P. 1134.
6. Стремоухов С. Ю. и др. Модель связанных квантовых мемристоров на основе пойманного в ловушку одиночного иона 171Yb^+ // *Письма в ЖЭТФ*, 2024, — Т. 119. — С. 343.

УДК 550.8.08

Атомный интерферометр на холодных атомах рубидия**Осипенко Г. В., Алейников М. С., Пашкова Ю.***ФГУП «ВНИИФТРИ»**141570, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)
osipenko.9494@mail.ru*

Работа посвящена актуальному состоянию разработки абсолютного атомного интерферометра, основанного на интерферометрии охлажденных атомов рубидия во ВНИИФТРИ. Приведены характеристики ключевых узлов экспериментальной установки, а также первые результаты атомной интерферометрии.

Ключевые слова: гравиметрия; холодные атомы; атомная интерферометрия.

Разработка квантовых сенсоров, основанных на технике интерферометрии охлажденных атомов, является одной из перспективных задач современной метрологии. Одним из примеров таких сенсоров является квантовый интерферометр, который находит свое применение в различных задачах беспутниковой навигации, геоархеологии и фундаментальной науки [1–3]. В настоящем докладе будет дано описание ключевых узлов макета атомного интерферометра, разработанного во ВНИИФТРИ, а также представлены последние результаты по интерферометрии холодных атомов.

Литература

1. Peters A., Chung K. Y. and Chu S. High-precision gravity measurements using atom interferometry // *Metrologia*, 2001. Vol. 38. P. 25.
2. Schmidt M., Senger A., Hauth M., Freier C., Schkolnik V. and Peters A. A mobile high-precision absolute gravimeter based on atom interferometry // *Gyroscopy and Navigations*, 2011. Vol. 2. P. 170.
3. Hu Z. K., Sun B. L., Duan X. C., Zhou M. K., Chen L. L., Zhan S., Zhang Q. Z. and Luo J. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom-interferometry absolute gravimeter // *Phys. Rev. A*, 2013. Vol. 88. P. 043610.

УДК 53.06

Атомный чип для задач квантовой сенсорикиАфанасьев А. Е.¹, Быкова Д. В.^{1,2}, Балыкин В. И.¹¹ *Институт спектроскопии Российской академии наук
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5*² *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
afanasiev@isan.troitsk.ru*

Квантовые сенсоры обеспечивают новый, более высокий уровень точности измерения физических полей в сравнении с классическими аналогами. Наиболее востребованными являются сенсоры ускорения, вращения, времени и магнитного поля. Их использование важно не только с точки зрения развития фундаментальной физики, но и для решения многих прикладных задач. Одними из наиболее точных квантовых сенсоров являются устройства на основе холодных атомов. На их основе функционируют гравиметры и системы навигации. Дальнейшее развитие квантовых сенсоров на основе холодных атомов может быть связано с использованием технологии атомного чипа, которая развивается в Институте спектроскопии РАН.

Ключевые слова: атомный чип; квантовый сенсор; холодные атомы.

Развитие квантовых сенсоров направлено на повышение точности измерений, что необходимо для решения как фундаментальных, так и прикладных задач. Для построения квантовых сенсоров используются различные платформы. С практической точки зрения наиболее удобной платформой является использование твердотельных систем. Например, центров окраски алмазов. Однако точность таких систем ограничена взаимодействием используемого квантового состояния с фоновой подсистемой твердого тела. Наибольшую точность демонстрируют сенсоры на основе атомарных газов, в которых такое взаимодействие отсутствует. При этом предельные значения по точности достигаются в системах на основе холодных и ультрахолодных газов [1]. Примером является использование стандартов частоты на основе атомных фонтанов.

В настоящее время наблюдается тенденция к разработке на основе атомных систем квантовых сенсоров для детектирования различных типов взаимодействия. Как правило увеличение чувствительности происходит за счет использования интерференционных методов. Развитие атомной интерферометрии на базе холодных и ультрахолодных атомов позволяет достичь квантового предела чувствительности при проведении экспериментов и построении квантовых сенсоров. К наиболее развитым квантовым сенсорам на основе холодных атомов можно отнести сенсоры для измерения инерциальных сил [2]. К таким сенсорам относятся акселерометры, гироскопы, гравиметры и градиометры. Точность современных атомных гравиметров и градиометров уже превосходит точность многих классических аналогов [3], а их практическое применение демонстрирует высокую степень надежности [4].

Одно из развивающихся направлений в атомной интерферометрии в настоящее время основано на использовании атомных чипов [5]. Атомный чип — это устройство, объединяющее в себе подходы атомной оптики и концепцию твердотельной электроники. В основе использования атомных чипов является локализация



атомов близи поверхности и управления ими за счет контроля электрических токов, протекающих по микропроводникам, сформированным на поверхности атомного чипа. Такой подход позволяет произвести интегрирование в одном устройстве элементов по охлаждению, локализации, манипулированию и измерению атомных ансамблей при одновременном контроле их внутренних и внешних степеней свободы. Ожидается, что за счет повышения универсальности и точности изготовления атомных чипов станет возможным, в ближайшей перспективе, использовать их не только для проведения целого ряда новых фундаментальных исследований, но и для развития новых технологий.

Разработка платформы использования атомных чипов для задач квантовой сенсорики ведется в Институте спектроскопии РАН. Продемонстрирован однослойный атомный чип с большим количеством локализованных атомов [6]. Проведены эксперименты по когерентному контролю локализованных вблизи атомного чипа атомов. Развитие данного направления позволит создать компактные атомные часы. На последующих этапах развития технологической платформы возможно построение инерциальных сенсоров.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №23-22-00255.

Литература

1. Degen C. L., Reinhard F., Cappellaro P. Quantum sensing // *Reviews of modern physics*, 2017. Vol. 89. P. 035002.
2. Geiger R., Landragin A., Merlet S., Pereira Dos Santos F. High-accuracy inertial measurements with cold-atom sensors // *AVS Quantum Science*, 2020. Vol. 2. P. 024702.
3. Gillot P., Francis O., Landragin A., Pereira Dos Santos F., Merlet S. Stability comparison of two absolute gravimeters: optical versus atomic interferometers // *Metrologia*, 2014. Vol. 51. P. L15.
4. Bidel Y., Zahzam N., Blanchard C., Bonnin A., Cadoret M., Bresson A., Rouxel D., Lequentrec-Lalancette M. F. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry // *Nature Communications*, 2018. Vol. 9. p.627.
5. Keil M., Amit O., Zhou S., Groswasser D., Japha Y., Folman R. Fifteen years of cold matter on the atom chip: promise, realizations, and prospects // *Journal of Modern Optics*, 2016. Vol. 63. P. 1840.
6. Efficient cold atom source from a single-layer atom chip / Skakunenko P., Bykova D., Afanasiev A., Kalmykov A., Kirtaev R., Balykin V. // *Chinese Optics Letters*, 2024. Vol. 22. P. 060201.

УДК 53.082.534

Физические принципы миниатюрных высокочувствительных магнитных сенсоров на основе светоиндуцированного дихроизма в парах щелочных металлов

Бражников Д. В., к. ф.-м. н., Макаров А. О., Козлова К. С., Вишняков В. И., Гончаров А. Н., к. ф.-м. н.

Институт лазерной физики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15Б

x-kvant@mail.ru

Предложены модификации методов Ханле и Белла—Блума для создания высокочувствительных сенсоров магнитного поля с использованием миниатюрных ячеек с парами ^{87}Rb или ^{133}Cs . Предложенные схемы обладают чувствительностью ~ 100 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$, отличаясь повышенными быстродействием и динамическим диапазоном.

Ключевые слова: квантовые сенсоры; магнитометры с оптической накачкой; эффект Ханле; метод Белла—Блума.

Магнитометры с оптической накачкой (МОН) активно применяются в фундаментальных и прикладных исследованиях. Например, в практической сфере они находят множество применений от задач материаловедения и геофизики до высокотехнологичной медицины [1].

Эффект Ханле в основном состоянии атомов щелочных металлов (как правило, Rb или Cs) является основой для многих современных миниатюрных МОН, которые отличаются высокой чувствительностью (~ 100 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$) [2]. Однако эти сенсоры обладают сравнительно малым динамическим диапазоном (≈ 10 нТл) и быстродействием (≈ 100 Гц), поскольку работают в режиме подавленной спин-обменной релаксации. Этот режим также требует нагрева ячейки с атомами до относительно высоких температур (130°C и выше). Все эти особенности ограничивают область применения таких сенсоров. Другой широко используемый метод Белла—Блума основан на динамическом способе регистрации прецессии магнитного момента среды во внешнем магнитном поле. Этот момент создается модулированной циркулярно поляризованной волной накачки, резонансно взаимодействующей с атомами. В классической схеме [3] используется простая абсорбционная техника регистрации резонансов по изменению полной интенсивности света, прошедшего через ячейку. Метод Белла—Блума отличается повышенным динамическим диапазоном вплоть до земного поля (≈ 50 мкТл) и быстродействием (~ 1 кГц), хотя, как правило, уступает по чувствительности Ханле-сенсорам (~ 1 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$) [4]. Для повышения чувствительности сенсоров, основанных как на методе Ханле, так и на методе Белла—Блума, часто используется поляриметрическая техника регистрации резонансов по повороту поляризации света [5], как следствие двулучепреломления среды.

В нашей работе вместо двулучепреломления используется другое явление — дихроизм, который в резонансном режиме проявляется гораздо сильнее, чем двулучепреломление. Это устраняет некоторые недостатки других схем, в частности, позволяет существенно понизить температуру ячейки. В обеих схемах мы используем миниатюрную стеклянную ячейку ($\approx 0,1$ см³) и один световой пучок, обладающий



эллиптической поляризацией. Такая конфигурация позволяет миниатюризировать физическую часть сенсора. Оба метода демонстрируют предельную чувствительность порядка $100 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ в условиях экранировки от земного магнитного поля. Быстродействие Ханле-сенсора находится на уровне 200 Гц, а сенсора Белла — Блума — на уровне 1 кГц. Работоспособность сенсора Белла — Блума была также проверена в условиях земного поля.

Работы выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант №23-12-00195).

Литература

1. Alem O. et al. An integrated full-head OPM-MEG system based on 128 zero-field sensors // *Frontiers in Neuroscience*, 2023. Vol. 17. P. 1190310.
2. Sheng D. et al. A microfabricated optically-pumped magnetic gradiometer // *Applied Physics Letters*, 2017. Vol. 110. P. 031106.
3. Bell W. E., Bloom A. L. Optically driven spin precession // *Physical Review Letters*, 1961. Vol. 6. P. 280.
4. Preusser J. et al. A microfabricated photonic magnetometer // *Sensors IEEE Conference*, 2008.
5. Petrenko M. V. et al. Single-beam all-optical nonzero-field magnetometric sensor for magnetoencephalography applications // *Physical Review Applied*, 2021. Vol. 15. P. 064072.

УДК 53.02

Квантовый алгоритм опорных векторов для классификации квантовых состояний**Киктенко Е. О.,^{1,2,3} Семёнов С. Д.^{1,2,4}**¹ *Российский квантовый центр
121205, г. Москва, Территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1*² *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1*³ *Математический институт им. В. А. Стеклова РАН
119991, г. Москва, ул. Губкина, 8*⁴ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

Разработан квантовый алгоритм опорных вектор для классификации квантовых состояний. Демонстрируются результаты его работы для задачи классификации однокубитных и многокубитных состояний, возникающих в том числе в квантовых фазовых переходах.

Ключевые слова: алгоритм опорных векторов; квантовое машинное обучение.

Квантовое машинное обучение [1] является одним из перспективных направлений развития теории квантовых алгоритмов. Большой интерес к этому направлению обусловлен ожиданием достижения полезного квантового преимущества в решении задач машинного обучения с использованием зашумленных квантовых устройств промежуточного масштаба.

Среди подходов к квантовому машинному обучению особую роль занимают алгоритмы, построенные на основе метода опорных векторов. Примечательно, что в рамках этого подхода отсутствует необходимость решения сложных невыпуклых задач оптимизации. Традиционно метод опорных векторов используется для решения задач классификации классических данных с использованием квантового процессора для получения элементов ядерной матрицы [2]. В настоящей работе рассматривается модификация этого алгоритма для классификации квантовых данных, представляющих собой квантовые состояния. При этом ядерная матрица вычисляется с помощью квантового процессора, а все другие вычисления — решение выпуклой задачи оптимизации для определения множителей Лагранжа — производится классически.

Работоспособность алгоритма демонстрируется на модельной задаче бинарной классификации однокубитных состояний, сгруппированных около полюсов сферы Блоха относительно случайной оси. Также рассматривается возможность различения состояний, соответствующих различным фазам многокубитных систем, без непосредственной томографии этих состояний.

Полученные результаты демонстрируют возможность практического применения квантовых алгоритмов машинного обучения для анализа квантовых данных.

Работа была поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 5 октября 2021).

Литература

1. Biamonte J., Wittek P., Pancotti N., Rebentrost P., Wiebe N., Lloyd S. Quantum machine learning // Nature, 2017. № 549. P. 195.
2. Zalivako I.V., Gircha A.I., Nikolaeva A.S., Drozhzhin D.A. et al. Supervised binary classification of small-scale digits images with a trapped-ion quantum processor // arXiv:2406.12007, 2024.

УДК 67.02

Серийная технология изготовления джозефсоновских интегральных схем

Москалев Д. О.^{1,2}, Соловьева А. А.^{1,2}, Смирнов Н. С.^{1,2}, Москалева Д. А.^{1,2},
Зикий Е. В.^{1,2}, Коршаков Н. Д.^{1,2}, Кривко Е. А.^{1,2}, Телеганов М. И.¹,
Андрощук М. В.¹, Никеров Г. Д.¹, Агафонова Ю. А.¹ и Родионов И. А.^{1,2}

¹ НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

² ВНИИА им. Н. Л. Духова

127030, г. Москва, ул. Суцневская, 22

Разработана технология изготовления джозефсоновских интегральных схем на 100-миллиметровых пластинах с коэффициентом вариации сопротивления переходов менее 4%. Разработана многослойная технология создания плоскопараллельных емкостных элементов, интегрируемых в сверхпроводниковые интегральные схемы.

Ключевые слова: джозефсоновские интегральные схемы; многослойная технология; 100-миллиметровая пластина.

Тенденция к масштабированию квантовых сопроцессоров и реализация многокубитных устройств предполагают переход от изготовления одиночных чипов на кристалле к пластине с высокой степенью интеграции. Ключевым элементов джозефсоновских интегральных схем (ДИС) является субмикронный джозефсоновский переход $Al/AIO_x/Al$, к которому предъявляются жесткие требования к воспроизводимости электрических параметров как в масштабе кристалла, так и в масштабе пластины. Реализация классической технологии создания ДИС с использованием органической резистивной маски и метода теневого осаждения не позволяет повторно изготовить субмикронные структуры на 100-мм пластине, что является существенным ограничивающим фактором.

Предлагаемый подход, основанный на введении координатно-переменных корректировок на линейные размеры электродов джозефсоновских переходов, позволил устранить эффект неравномерного распределения потока металла через субмикронные отверстия в органической маске в пределах пластины. На основании экспериментальных исследований, а также оптимизационным работам по формированию высококачественных тонкопленочных электродов и воспроизводимого туннельного барьера [1, 2] разработан технологический маршрут изготовления ДИС, позволяющий формировать структуры с коэффициентом вариации критического тока (σ/I_c) менее 7,6% для площади переходов $0,025 \text{ мкм}^2$ и менее 4% для площади $0,1 \text{ мкм}^2$ на пластине диаметром 100 мм. Использование предложенных методик и их объединение с технологическими процессами создания высокодобротных алюминиевых копланарных резонаторов с травлением подложки в зазоре металлического слоя [3], а также интеграция воздушных перемычек для увеличения связности схемы позволили создать кубиты трансмоны с временами когерентности более 500 мкс (более 350 мкс на временном отрезке 12 часов).

Разработана многослойная технология создания плоскопараллельных емкостных сосредоточенных элементов, в основе которой лежит бездиссипативный диэлектрический слой (тангенс угла диэлектрических потерь $2 \cdot 10^{-6}$). Особенностью

технологии является ее полная интеграция с алюминиевой платформой, что позволило создать широкополосный параметрический криоусилитель с согласованием импеданса (15 дБ, 600 МГц, -105 дБм), способный работать в режиме сверхмалых привносимых шумов.

Разработанные методы создания высококогерентных ДИС с возможностью масштабирования процессов до 100-миллиметровых пластин, а также многослойная технология создания сосредоточенных элементов открывают перспективу серийного производства квантовых сверхпроводниковых устройств.

Литература

1. Moskalev D. O. et al. Optimization of shadow evaporation and oxidation for reproducible quantum Josephson junction circuits // *Scientific Reports*, 2023. Vol. 13. № 1. P. 4174.
2. Pishchimova A. A. et al. Improving Josephson junction reproducibility for superconducting quantum circuits: Junction area fluctuation // *Scientific Reports*, 2023. Vol. 13. № 1. P. 6772.
3. Zikiy E. V. et al. High-Q trenched aluminum coplanar resonators with an ultrasonic edge microcutting for superconducting quantum devices // *Scientific Reports*, 2023. Vol. 13. № 1. P. 15536.

УДК 538.945

Протоколы двухкубитных квантовых операций на основе сверхпроводниковой электроники

к. ф.-м. н., Бастракова М. В.¹, Вожаков В. А.^{1,2}, Линева А. В.¹, Куландин Д. А.¹,
д. т. н., Клёнов Н. В.³, д. ф.-м. н., Соловев И. И.²

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
bastrakova@phys.unn.ru

² Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д. В. Скобельцына МГУ

119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Разработан и протестирован протокол двухкубитной ZX-операции, который можно выполнить в рамках методики управления при помощи SFQ-устройств быстрой однокубитной электроники на регистре сверхпроводниковых транзмон-кубитов.

Ключевые слова: транзмон; SFQ; двухкубитные операции; сверхпроводниковая электроника.

Традиционные схемы реализации квантовых операций на сверхпроводниковых многокубитных процессорах основаны на передаче аналоговых микроволновых сигналов от классического контроллера при комнатной температуре к квантовому чипу. Однако при масштабировании уже существуют сложности с индексным управлением и считыванием кубитов. В связи с этим, разрабатываются дополнительные схем мультиплексирования микроволновых сигналов [1]. Одним из перспективных и активно исследуемых решений проблем мультиплексирования является разработка встроенных классических контроллеров в непосредственной близости к кубитному чипу (на мК или К температурных уровнях в криостате), которые повышают масштабируемость квантовых процессоров за счет локальной генерации и маршрутизации управляющих сигналов. Перспективной технологией на роль низкотемпературного источника сигналов выступает сверхпроводниковая цифровая электроника (SFQ — single flux quantum). При этом управление кубитами на основе SFQ-устройств основывается на последовательностях коротких униполярных импульсов напряжения (SFQ-импульсов) вместо микроволновых управляющих сигналов. Данный подход был уже апробирован для реализации однокубитных операций в транзмонах на основе регулярных последовательностей SFQ-импульсов [2, 3], а также на основе оптимизированных протоколов [4, 5].

Важным шагом дальнейших разработок является реализация двухкубитных операций на основе сверхпроводниковой цифровой электроники, требующая разработки оптимальных протоколов управления. В недавней работе [6] был предложен первый подход на основе управляющих последовательностей SFQ-импульсов для транзмонов и флаксониумов с фиксированной емкостной связью. Показано, что ключевой проблемой при реализации двухкубитных операций, требующей дополнительного анализа, является контроль за утечкой в вышележащие энергетические состояния. В данной работе нами был предложен оригинальный протокол



управления на основе регулярных последовательностей SFQ-импульсов одной полярности, при которых совершается выбранная двухкубитная операция, на примере ZX-операции. Численно проведен расчет квантовой динамики емкостно взаимодействующих трансмон кубитов, с учетом контроля за утечкой на высшие энергетические состояния в системе. Предлагаемый протокол идеологически схож с традиционным микроволновым подходом на основе перекрестного резонанса (Cross-Resonance). Подобраны управляющие параметры SFQ последовательностей с учетом силы связи между кубитами, тактовых частот dc-SFQ генераторов и характерных диапазонов частот и нелинейностей кубитов. Обсуждается процесс понижения частоты сигнала опорного генератора, с помощью цепочки T-триггеров из библиотеки устройств цифровых сверхпроводниковых схем.

Литература

1. Huang R., Geng X., Wu X., Dai G., Yang L., Liu J., Chen W. Cryogenic Multiplexing Control Chip for a Superconducting Quantum Processor // *Phys. Rev. Applied*, 2022. Vol. 18. P. 064046.
2. McDermott R., Vavilov M.G. Accurate Qubit Control with Single Flux Quantum Pulses // *Phys. Rev. Applied*, 2014. Vol. 2. № 1. P. 01400.
3. Liu C. H., Ballard A., Olaya D., Schmidt D. R., Biesecker J., Lucas T., Ullom J., Patel S., Rafferty O., Opremcak A., Dodge K., Iaiia V., McBroom T., DuBois J. L., Hopkins P. F., Benz S. P., Plourde B. L. T., McDermott R. Single Flux Quantum-Based Digital Control of Superconducting Qubits in a Multichip Module // *PRX Quantum*, 2023. Vol. 4. P. 030310.
4. Leonard E. Jr., Beck M. A., Nelson J., Christensen B. G., Thorbeck T., Howington C. Digital coherent control of a superconducting qubit // *Phys. Rev. Applied*, 2019. Vol. 11. № 1. P. 014009.
5. Vozhakov V., Bastrakova M., Klenov N., Satanin A., Soloviev I. Speeding up qubit control with bipolar single-flux-quantum pulse sequences // *Quantum science and technology*, 2023. Vol. 8. P. 035024.
6. Jokar M., Rines R., Chong F. Practical implications of SFQ-based two-qubit gates // *IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 2021. P. 402–412.

УДК 004.2

Описание эволюции логических состояний при изменениях в логическом базисе**Антипов А.В.***Российский квантовый центр**121205, г. Москва, Территория Инновационного центра «Сколково»,**Большой бульвар, 30, стр. 1*

Эволюция логических состояний описывается с помощью формализма супероператоров в случае, когда логическое подпространство кода коррекции ошибок не подвергается преобразованиям. В этой работе мы предоставляем теоретический подход, который дает возможность описывать одновременные изменения и в закодированном логическом состоянии, и в соответствующем логическом подпространстве, при потенциально неунитарных преобразованиях. Применение данного подхода демонстрируется на примере описания эволюции логического состояния при движении дефектов в поверхностном коде.

Работа была поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 5 октября 2021).

УДК 537.9

Магнные интерконнекты для кубитов различных типовТемная О. С.^{1,2}, Каткова А. С.¹¹ *Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1.
ostemnaya@gmail.com*² *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7*

Предложен способ связи джозефсоновских переходов и центров окраски в алмазах с помощью магнных интерконнектов. Приведены основные характеристики магнных интерконнектов и их сравнение с параметрами стандартных межсоединений. Показаны перспективы создания масштабируемых платформ квантовых вычислений с помощью технологий магноники.

Ключевые слова: магноника; магнные интерконнекты; межсоединения; квантовые вычисления.

Интерконнекты, или межсоединения, являются важнейшими компонентами систем квантовых вычислений, которые обеспечивают связь и взаимодействие между кубитами. К основным типам межсоединений для кубитов относятся микроволновые резонаторы, оптические межсоединения, сверхпроводящие кабели и прямая связь между кубитами. Каждый тип связи обладает определенными возможностями и имеет свои проблемы. Микроволновые резонаторы обеспечивают высокую точность квантовых операций, но требуют криогенной среды. Оптические межсоединения отлично подходят для связи на больших расстояниях, но сталкиваются с проблемами при создании эффективных интерфейсов «кубит-фотон». Сверхпроводящие кабели обеспечивают соединения с малыми потерями в криогенных условиях, но их сложно интегрировать в масштабируемые системы. Прямое соединение кубита с кубитом упрощает архитектуру, но требует точного контроля и не подходит для взаимодействия на больших расстояниях.

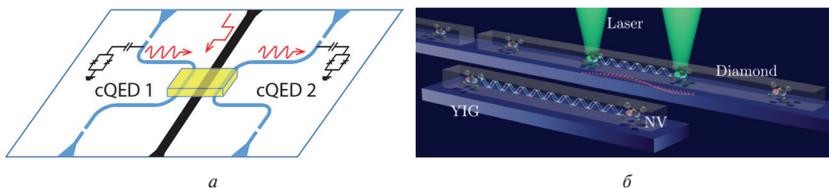


Рис. 1. а) Связь сверхпроводящих кубитов магнным волноводом;
б) связь кубитов на NV-центрах магнным волноводом [4]

Мы предлагаем использовать для связи кубитов магнные интерконнекты — межсоединения из высокодобротных материалов, в которых могут распространяться волны намагниченности. Магнные среды имеют ряд преимуществ, такие как возможность использования их при комнатных температурах [1], широкий частотный диапазон (1–10000 ГГц) [2], высокие значения коэффициентов связи

со сверхпроводящими контактами и NV-центрами (десятки и сотни МГц) [3], односторонность передачи информации [2].

Литература

1. Awschalom D. D. et al. Quantum engineering with hybrid magnonics systems and materials // arXiv:2102.03222v1 (2021).
2. Odintsov S. A., Sheshukova S. E., Nikitov S. A., Ogrin F. Y., Sadovnikov A. V. Nonreciprocal magnonic directional coupler based on metal-coated YIG adjacent stripes // Applied Physics Letters, 2024. 124, 112408.
3. Fukami M., Candido D. R., Awschalom D. D., Flatté M. E. Opportunities for Long-Range Magnon-Mediated Entanglement of Spin Qubits via On- and Off-Resonant Coupling // Physical Review X Quantum 2, 040314 (2021).



УДК 530.145

Атомный квантовый компьютер: сборка массивов холодных атомов

Уянгулов К. А.^{1,2}, Стручалин Г. И.¹, Бобров И. Б.¹, Страупе С. С.^{1,2}

¹ Центр квантовых технологий,
физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
uiangulov.ka20@physics.msu.ru

² Российский квантовый центр
121205, г. Москва, Территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1

Разработаны алгоритмы для сборки массивов холодных атомов: с использованием «жадной» стратегии и Венгерского алгоритма. Продемонстрировано их успешное применение в эксперименте с однолучевым пинцетом. Исследуется возможность использования многолучевого пинцета для ускорения процесса сборки.

Ключевые слова: сборка массивов холодных атомов; алгоритмы на графах; оптический пинцет.

Массивы нейтральных атомов в оптических ловушках являются перспективной платформой для квантовых вычислений. Однако детерминированное заполнение массива ловушек атомами — сложная задача на практике. Чтобы создать вычислительный регистр с требуемой конфигурацией атомов, необходимо выбрать подмножество ловушек (целевой массив) и переместить в них атомы из других ловушек с помощью оптического пинцета. Время жизни атомов и скорость пинцета конечны, поэтому возникает задача — переместить атомы за минимально возможное время. Также при переносе пинцет не может сильно приближаться к неподвижным атомам, чтобы избежать столкновений.

Первый предлагаемый алгоритм состоит из двух этапов. Сначала с помощью венгерского метода [1] для каждой ловушки выбирается атом, который будет перемещен в нее. На втором этапе полученный список перемещений организуется в граф зависимостей, к которому применяется алгоритм топологической сортировки [2, 3] для нахождения корректного порядка перемещений. Альтернативный, жадный, алгоритм заполняет ловушки в порядке удаления от центра целевого массива. Для каждой незаполненной ловушки ищется ближайший атом, и строится бесстолкновительный маршрут к ловушке.

В дополнение к предыдущим методам, использующим однолучевой пинцет, в работе также исследуется возможность ускорения процесса сборки с применением многолучевого пинцета.

Работа поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной Карты Квантовые Вычисления (договор № 868-1.3-15/15-2021 от 5.10.2021).

Литература

1. Woojun Lee, Hyosub Kim, Jaewook Ahn, Defect-free atomic array formation using Hungarian matching algorithm // Phys. Rev. A, 2017. 95, 053424.

2. Kahn A. B. Topological sorting of large networks. *Commun. ACM*, 1962. 5, 11.
3. Remy El Sabeh, Jessica Bohm, Zhiqiang Ding, Stephanie Maaz, Naomi Nishimura, Izzat El Hajj, American Mouawad, and Alexandre Cooper. Efficient algorithms to solve atom reconfiguration problems. II. Assignment-rerouting-ordering algorithm // *Phys. Rev. A*, 2023. 108, 023108.



УДК 530.145

Нечеткие измерения и смягчение ошибок на основе принципов полноты, адекватности и точности в оптических квантовых информационных технологиях

Богданов Ю. И.^{1,2,3}, Богданова Н. А.^{1,2}, Лукичев В. Ф.²

¹ Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

³ Российский квантовый центр
121205, г. Москва, Территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1

Мы представляем общий подход для оценки квантовых информационных технологий с помощью нечетких квантовых измерений. Мы применяем разработанный подход для оценки качества оптических квантовых чипов. Используя методы томографии квантовых состояний и процессов, разработанные в наших более ранних работах, мы определяем полные, адекватные и высокоточные модели оценки оптических квантовых чипов.

Ключевые слова: квантовые состояния; квантовые процессы; квантовая томография; корневой подход; оптические квантовые чипы; полнота; адекватность и точность квантовых измерений.

В этом докладе мы представляем общий подход для оценки оптических квантовых информационных технологий с помощью нечетких квантовых измерений на основе принципов полноты, адекватности и точности [1]. Полнота означает, что квантовый протокол измерения позволяет нам восстановить любое квантовое состояние и любую матрицу плотности. Чтобы проверить свойство полноты, мы вводим специальную матрицу, основанную на операторах квантовых измерений. Полнота имеет место тогда и только тогда, когда рассматриваемая матрица измерений является матрицей полного ранга. Адекватность означает согласованность между полученными экспериментальными данными и развитой квантовой моделью. Проверка адекватности проводится с помощью критерия хи-квадрат. Точность квантовой томографии определяется вероятностью совпадения реконструированного состояния с теоретическим (Fidelity). Этот параметр показывает, насколько близко восстановленное состояние соответствует идеальному теоретическому состоянию.

Оценка качества квантовых операций, выполняемых с помощью оптических квантовых чипов, сводится к реконструкции так называемых состояний Чоя-Ямилковского, описываемых формализмом хи-матриц. Наш подход к измерению оптических квантовых чипов предполагает рассмотрение двух разных типов измерений. Первый тип измерений сводится к оценке вероятностей перехода. Мы рассматриваем вероятность того, что фотон из некоторой заданной моды на входе окажется в некоторой заданной моде на выходе. Второй тип измерений основан на состояниях, в которых фотон представлен в суперпозиции двух мод с заданной разностью фаз. Такие состояния создаются с помощью светоделителя и фазовращателя для управления относительной фазой между состояниями. Простейший

протокол сводится к измерению только вероятностей перехода. Этот протокол не удовлетворяет критерию полноты, о котором говорилось выше. Чтобы построить полный протокол, мы добавляем проекции состояний, в которых фотон представлен суперпозициями различных мод. Мы показываем, что методы и алгоритмы, разработанные в рамках анализа, основанного на принципах полноты, адекватности и точности в приложении к нечетким квантовым измерениям, обеспечивают эффективные средства характеристики оптических квантовых чипов.

Результаты выполненного исследования имеют практическое значение для задач обеспечения качества и эффективности оптических квантовых информационных технологий.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0016.

Литература

1. Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Bantysh B. I., Fastovets D. V., Lukichev V. F. Quantum tomography based on principles of completeness, adequacy and fidelity // Proc. SPIE 11022, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2018, 110222M (15 March 2019); arXiv:1906.06416 [quant-ph].



УДК 530.145

Атомный квантовый компьютер: разложение однокубитных операций и детектирование атомов

Стручалин Г. И.¹, Воробьев А. Е.¹, Михайлова В. И.^{1,2}, Бобров И. Б.¹,
Страупе С. С.^{1,2}

¹ Центр квантовых технологий,
физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
struchalin.gleb@physics.msu.ru

² Российский квантовый центр
121205, г. Москва, Территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1

Рассмотрено разложение однокубитных операций на последовательность поворотов вокруг осей X и Y, которое устойчиво к флуктуациям частоты Раби. Реализовано распознавание положений атомов на фотоснимках и проведено сравнение алгоритмов детектирования атомов для повышения точности квантовых измерений.

Ключевые слова: квантовые вычисления; однокубитные операции; обработка изображений.

Запуск программы на квантовом компьютере является многоступенчатой задачей. От преобразования исходного кода программы в форму, пригодную для исполнения, до получения результатов работы проходит множество промежуточных этапов, затрагивающих как программную, так и аппаратную составляющие. Доклад посвящен двум таким этапам применительно к квантовому вычислителю на основе нейтральных атомов: разложению однокубитных операций, которое устойчиво к флуктуации частоты Раби, а также процессу распознавания и детектирования атомов на фотоснимках.

Разложение квантовых операций происходит при компиляции квантовой программы в набор «родных» вентилях. Для атомной платформы естественными операциями являются однокубитные повороты вокруг осей X и Y на сфере Блоха, а также перепутывающий двухкубитный вентиль CZ. При выполнении вентилях неизбежно присутствуют ошибки, чье влияние стремятся минимизировать. Одним из типов ошибок является флуктуация частоты Раби, возникающая, например, из-за ненулевой температуры теплового движения атомов в оптических ловушках или шумов интенсивности управляющих лазеров. В работе теоретически и экспериментально исследовано разложение произвольного однокубитного преобразования на последовательность 6 или 7 поворотов вокруг чередующихся осей X и Y. Показано, что данное разложение обладает повышенной устойчивостью к флуктуациям частоты Раби, чем стандартное разложение на 3 поворота.

Обработка изображений атомов, получаемых с помощью КМОП фотокамеры, требуется как при сборке и инициализации вычислительного регистра атомов, так и при измерении квантового состояния регистра, получившегося после применения квантовых операций согласно программе. В работе реализован алгоритм когерентного перемещения точек для нахождения на этапе калибровки положений оптических ловушек на изображении, где потенциально могут находиться атомы.

Далее проведено сравнение различных методов детектирования атомов в ловушках в целях минимизации суммарной ошибки детектирования, которая влияет на качество измерений квантовых состояний атомного регистра. Рассмотрены следующие варианты: простейший пороговый детектор, байесовский детектор, детектор на основе сверточных нейросетей.

Работа поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной Карты Квантовые Вычисления (Договор № 868-1.3-15/15-2021 от 5.10.2021).



УДК 621.38

Решение уравнения теплопроводности на сверхпроводниковом квантовом сопроцессоре Snowdrop 4Q

Смирнов Н. С.^{1,2}, Матанин А. Р.^{1,2}, Москалев Д. О.^{1,2}, Иванов А. И.^{1,2}, Москалева Д. А.^{1,2}, Соловьева А. А.^{1,2}, Полозов В. И.^{1,2}, Житков Н. М.¹, Ечеистов В. В.^{1,2}, Коробенко И. С.¹, Малеванная Е. И.^{1,2}, Зикий Е. В.^{1,2}, Кривко Е. А.^{1,2}, Коршаков Н. Д.^{1,2}, Телеганов М. И.¹, Гетманов Б. К.¹, Андрощук М. В.¹, Никеров Г. Д.¹, Агафонова Ю. А.¹, Баклыков Д. А.^{1,2}, Жуков А. А.², Бабухин Д. В.², Белов В. В.², Лебедев А. В.², Погосов В. В.², Родионов И. А.^{1,2}

¹ ВНИИА им. Н. Л. Духова

127030, г. Москва, ул. Суцеская, 22

² НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

irodionov@bmstu.ru

Гибридные квантово-классические вычисления с применением суперкомпьютеров со сверхпроводниковыми квантовыми сопроцессорами приближаются к границе практически полезных. Основными барьерами на этом пути являются проблемы повышения точности квантовых логических операций, масштабирования квантовых сопроцессоров и помехоустойчивость квантовых алгоритмов. В работе представлены результаты разработки высокоточного сверхпроводникового квантового сопроцессора Snowdrop 4Q. Продемонстрированы экспериментальные результаты решения уравнения теплопроводности с применением разработанного вариационного квантового алгоритма на сверхпроводниковом сопроцессоре Snowdrop 4Q.

Ключевые слова: сверхпроводимость; квантовый сопроцессор; квантовые вычисления; гибридные вычисления.

Создание практически полезного квантового компьютера ограничено точностью квантовых логических операций, масштабируемостью процессоров, а также эффективностью квантовых алгоритмов, требовательных к параметрам квантового процессора. Одной из важнейших практически важных задач является решение линейных дифференциальных уравнений. Разработанный подход к решению линейных дифференциальных уравнений, использующий вариационные методы и применение гибридных классически-квантового алгоритма [1], требует меньшего количества кубитов и более устойчив к ошибкам квантовых вентилях в сравнении с полностью квантовыми алгоритмами.

В НОЦ Функциональные Микро/Наносистемы (НОЦ ФМН) — совместном центре МГТУ им. Н. Э. Баумана и ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова» разработан четырехкубитный сверхпроводниковый квантовый сопроцессор Snowdrop 4Q. Архитектура квантового сопроцессора основана на перестраиваемых по частоте кубитах-трансмонах [2] с управляемой связью между кубитами. В работе представлены результаты разработки квантового сопроцессора и итеративной и многоэтапной процедуры калибровки кубитных операций, в результате которых на процессоре получены высокие точности квантовых вентилях и считывания:

- средняя по сопроцессору точность однокубитных вентилях: 99,76 %;

- средняя по сопроцессору точность двухкубитных вентилей CZ: 99,11 %;
- средняя точность считывания состояния кубитов: 96,18 %.

Полученные высокие точности квантовых операций позволили реализовать на сопроцессоре серию квантовых алгоритмов: симуляция динамики 4-спиновой цепочки Изинга в поперечном поле, при котором также был реализован метод смягчения ошибок с применением нейросетевого обучения [3], позволивший улучшить результаты симуляции, реализован алгоритм Харроу, Хассидима и Ллойда [4] для решения системы линейных уравнений матрицы 2×2 с достоверностью 97,6–98,5 %, наконец, продемонстрирована работа вариационного алгоритма для решения уравнения теплопроводности на сетке из 8 узлов. В результате получена высокая точность выполнения алгоритма 98,8 %, подтверждающая его помехоустойчивость.

Литература

1. Guseynov N. M. et al. Depth analysis of variational quantum algorithms for the heat equation // *Physical Review A*, 2023. Vol. 107. № 5. P. 052422.
2. Smirnov N. S. et al. Wiring surface loss of a superconducting transmon qubit // *Scientific Reports*, 2024. Vol. 14. № 1. P. 7326.
3. Zhukov A., Pogosov W. Quantum error reduction with deep neural network applied at the post-processing stage // *Quantum Information Processing*, 2022. Vol. 21. № 3. P. 93.
4. Babukhin D. V. Harrow-Hassidim-Lloyd algorithm without ancilla postselection // *Physical Review A*, 2023. Vol. 107. № 4. P. 042408.



УДК 530.145

Метод аппроксимации статистических распределений с тяжелыми хвостами и его применение в задачах квантовых информационных технологий

Богданова Н. А.^{1,2}, Богданов Ю. И.^{1,2,3}, Лукичев В. Ф.²

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

² *Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*

³ *Российский квантовый центр
121205, г. Москва, Территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1*

На примере распределений Пирсона IV типа рассмотрена процедура дополнения классического распределения вероятностей до квантового состояния. Получены волновая функция, отвечающая распределениям Пирсона IV типа, а также набор базисных функций на ее основе. Продемонстрировано применение разработанного метода к задачам статистического анализа данных и квантовой механики. Показана эффективность разработанного подхода к аппроксимации статистических распределений с тяжелыми хвостами.

Ключевые слова: процедура дополнения классического распределения вероятностей до квантового состояния; распределения Пирсона IV типа; статистические распределения с тяжелыми хвостами; наборы базисных функций; координатное и импульсное представления.

Среди важных задач статистического анализа данных особое значение имеет задача, связанная с построением многопараметрических статистических моделей, которые допускают устойчивое восстановление неизвестных параметров распределений по экспериментальным данным. Оказывается, что существует только один класс моделей такого рода и это, как раз, те модели, которые рассматриваются в квантовой механике [1]. Это означает, что статистическая модель квантовой механики имеет существенное преимущество по отношению к любым другим статистическим моделям, т.е. оказывается, в некотором роде, выделенной моделью. Заметим, что классическая вероятностная модель может рассматриваться как «урезанная» версия квантовой модели, в которой не учитывается возможность взаимно-дополнительных измерений, несовместных наблюдаемых, запутанных состояний и т.п. Это означает, что все важные математические результаты, полученные в классической теории, могут быть использованы и в квантовой теории. Кроме того, квантовая теория делает структуру вероятностной теории более совершенной и открывает новые практические возможности для анализа данных, как классических, так и квантовых.

В квантовой механике и статистическом анализе нередко приходится иметь дело с распределениями, имеющими «тяжелые хвосты» (такие распределения весьма медленно спадают с увеличением расстояния от центра группирования данных). В случае одномодальных распределений может быть применен подход, основанный на робастной непараметрической аппроксимации плотности распределения

посредством минимизации информации Фишера, связанной с параметром сдвига [2]. В общем случае, для анализа такого рода распределений может быть применен набор базисных функций, рассматриваемый в настоящей работе. Выполненное исследование является продолжением нашей работы [3].

Разработанный метод будет полезен в различных задачах статистического анализа данных, включая задачи квантовых информационных технологий в системах с непрерывными переменными.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0016.

Литература

1. Bogdanov Yu. I. Quantum Mechanical View of Mathematical Statistics, New Topics in Quantum Physics Research // Nova Science, 2006. P. 1–36. arXiv: quant-ph/0303013.
2. Bogdanov Yu. I. Fisher information and a nonparametric approximation of the distribution density // Industrial laboratory, 1998. Vol. 64. № 7. P. 472–477.
3. Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Лукичев В. Ф. Набор базисных функций, порожаемый распределениями Пирсона IV типа, и его применение к задачам статистического анализа данных и квантовой механики // Труды математического института им. В. А. Стеклова, 2024. — Т. 324. — С. 60–72.



УДК 530.145

Ослабление ошибок приготовления, преобразования и измерения двухкубитового состояния в процедуре томографии гейта Мёльмера — Соренсена

Дмитриев И. А.^{1,2}, Богданов Ю. И.^{1,2}, Бантыш Б. И.², Кокшаров К. Б.^{1,2}, Лукичев В. Ф.²

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

² Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

Рассматривается томография запутывающего двухкубитного преобразования Мёльмера — Соренсена. В целях ослабления ошибок приготовления, преобразования и измерения используется нечеткая модель реконструкции квантового процесса, позволяющая учесть ошибки считывания квантового состояния. Применение нечеткой модели квантовых измерений позволяет добиться значительно большей точности реконструкции квантового процесса по сравнению со стандартным подходом, когда ошибки не учитываются.

Ключевые слова: ионные кубиты; квантовая томография; нечеткие измерения; квантовая запутанность.

Общепринятый подход к томографии квантовых процессов заключается в реконструкции матрицы квантового процесса, или так называемой χ -матрицы, предназначенной для описания марковской динамики квантового процесса. При этом ошибки считывания квантового состояния, вызванные несовершенством измерений, представляют собой серьезную проблему, приводящую к существенным неточностям. В настоящей работе мы расширяем методы, предложенные в наших работах [1, 2, 3], применяя их к задаче реконструкции квантовых процессов на ионной платформе. Использование нечетких операторов квантовых измерений в процедуре реконструкции гейта Мёльмера — Соренсена эффективно нивелирует систематические отклонения статистики, вызванные ошибками считывания, что приводит к существенно более точной реконструкции квантового процесса.

Мы проверяем наш подход посредством численных экспериментов с симуляцией измерения запутанных двухкубитных состояний, полученных с использованием гейта Мёльмера — Соренсена. При использовании нечеткой модели реконструкции матрицы процесса мы наблюдаем значительное улучшение точности реконструкции по сравнению со стандартным подходом, когда ошибки не учитываются. Полученные результаты демонстрируют, что применение нечеткой модели реконструкции превосходит стандартный подход, в котором ошибки считывания игнорируются, таким образом подтверждая эффективность разработанной модели.

Полученные результаты имеют существенное значение для разработки высокоточных методов контроля технологии квантовых вычислений на ионной платформе.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда,
проект № 22-12-00263.*

Литература

1. Bogdanov Yu. I., Bantysh B. I., Bogdanova N. A. et al. High-fidelity tomography of fluorescent ion qubits under conditions of limited discrimination between bright and dark levels // International Conference on Micro-and Nano-Electronics 2021. SPIE, 2022. Vol. 12157. P. 650–657.
2. Bogdanov Yu. I., Dmitriev I. A., Bantysh B. I. et al. High-precision tomography of ion qubits based on registration of fluorescent photons // Laser Physics Letters, 2023. Vol. 20. № 6. P. 065202.
3. Dmitriev I. A., Bogdanov Yu. I., Bantysh B. I. et al. Correction of Quantum State Read-out Statistics Using the Fuzzy Measurements Model // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № Suppl 1. P. S357–S362 (Published: 21 March 2024).



УДК 530.145

Прецизионная реконструкция поляризационных квантовых состояний в условиях зашумленных измерений

Гольшев И. К.^{1,2}, Богданов Ю. И.^{1,2}, Богданова Н. А.^{1,2}, Лукичев В. Ф.²¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

² Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

В настоящей работе представлен алгоритм формирования адекватной модели реконструкции поляризационных квантовых состояний. Подход на основе нечетких измерений позволяет существенно повысить точность восстановления квантовых состояний в условиях влияния квантовых шумов и процессов декогерентизации.

Ключевые слова: кубиты; квантовая томография; нечеткие измерения; декогерентизация.

В задачах контроля качества квантовых технологий и в квантовой обработке информации важную роль играют квантовые измерения. Измерительные системы, применяемые на практике, подвержены влиянию ошибок, что приводит к пониженной точности восстановления квантовых состояний. Подход на основе нечетких измерений, развитый в работах [1, 2, 3], позволяет разработать устойчивые к шумам протоколы квантовой томографии.

Настоящая работа сосредоточена главным образом на томографии поляризационных кубитов, широко применяющихся в квантовых информационных технологиях. Измерения поляризационных состояний осуществляются с помощью стандартного гаджета, состоящего из полу- и четвертьволновой фазовых пластин, позволяющих изменять измерительный базис. В качестве источников ошибок были рассмотрены равномерно распределенные случайные ошибки в задании углов отклонения быстрых оптических осей фазовых пластинок от вертикали.

В рамках разработанных нами компьютерных моделей на языке программирования MatLab выполнено численное моделирование томографии поляризационных кубитов. Исследование проведено с помощью двух различных методов — стандартного подхода с идеальными операторами измерения и подхода нечетких измерений. Показано, что стандартный подход, не учитывающий ошибки в установке углов, приводит к насыщению точности реконструкции при увеличении объема выборки, в то время как подход нечетких квантовых измерений приводит к неограниченному увеличению точности с ростом количества измерений. В методе нечетких измерений учет канала с шумом заключается в переносе зашумляющего преобразования с квантового состояния на операторы измерения. Такой подход дает значительно более высокую точность по сравнению со стандартным методом. Применение полученных результатов позволит демпфировать ошибки, возникающие при случайном отклонении углов ориентации фазовых пластинок.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда,
проект № 22-12-00263.*

Литература

1. Bogdanov Yu. I., Bantysh B. I., Bogdanova N. A., Kvasnyy A. B., Lukichev V. F. Quantum states tomography with noisy measurement channels // International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016. Proc. of SPIE, 2016. Vol. 10224. P. 696–705.
2. Bogdanov Yu. I., Dmitriev I. A., Bantysh B. I., Bogdanova N. A., Lukichev V. F. High-precision tomography of ion qubits based on registration of fluorescent photons // Laser Physics Letters, 2023. Vol. 20. № 6. P. 065202.
3. Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Kuznetsov Yu. A., Koksharov K. B., Lukichev V. F. Precise Tomography of Qudits // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № 3. P. 135–143.



УДК 530.145

Методы измерения квантовых систем гарантированной точности

Кузнецов Ю. А.^{1,2}, Богданов Ю. И.^{1,2}, Богданова Н. А.^{1,2}, Лукичев В. Ф.²¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*² *Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*

Рассматриваются протоколы квантовых измерений, основанные на преобразованиях Лоренца и подходе нечетких квантовых измерений. Разработанные протоколы позволяют осуществлять прецизионный контроль оптических поляризационных кубитов, а также кудитов на базе ионов и атомов в ловушках. Посредством слабозвмущающих адаптивных квантовых измерений разработанные алгоритмы позволяют осуществлять прецизионный контроль эволюции состояний кудитов. Благодаря слабому возмущению квантовых состояний такая схема контроля позволяет отслеживать эволюцию квантовой системы в режиме реального времени. Разработанная методика может быть применена в различных областях квантовых вычислений и квантовых коммуникаций.

Ключевые слова: квантовая томография; нечеткие измерения; кудиты.

Общепринятый подход к томографии квантовых состояний заключается в проведении измерений и реконструкции матрицы плотности квантового состояния. Протокол, основанный на преобразовании Лоренца, модифицирует измерительный базис таким образом, чтобы он наиболее эффективно позволял собирать информацию о квантовом состоянии за счет небольших возмущений самого состояния. В результате таких измерений только небольшая часть представителей квантового статистического ансамбля используется для реконструкции состояний [1].

Использование подхода нечетких квантовых измерений позволяет повысить точность реконструкции в условиях наличия систематических ошибок, таких как хроматическая абберация волновых пластин в случае оптических поляризационных кубитов [2], а также амплитудно-фазовой релаксации.

Представляемый подход был разработан для томографии кубитов и был расширен на случай многомерных d-уровневых систем — кудитов. Благодаря адаптивной подстройке протокола измерений разработанные протоколы превосходят стандартные протоколы томографии.

Полученные результаты имеют существенное значение для разработки высокоточных методов контроля квантовых состояний и процессов.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда,
проект № 22-12-00263.*

Литература

1. Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Bantysh B. I., Kuznetsov Yu. A. The concept of weak measurements and the super-efficiency of quantum tomography // International Conference on Micro-and Nano-Electronics, 2018. Vol. 11022. SPIE, 2019. P. 709–720.

2. Bantysh B. I., Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Kuznetsov Yu. A. Precise tomography of optical polarisation qubits under conditions of chromatic aberration of quantum transformations // *Laser Physics Letters*, 2020. Vol. 17. № 3. P. 035205.
3. Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Kuznetsov Yu. A., Lukichev V. F. High-fidelity tracking of the evolution of multilevel quantum states // *International Conference on Micro-and Nano-Electronics*, 2021. Vol. 12157. SPIE, 2022. P. 623–631.



УДК 530.145

Разработка оптимальных протоколов измерений ионных кудитов

Кокшаров К. Б.^{1,2}, Богданов Ю. И.^{1,2}, Бантыш Б. И.², Лукичёв В. Ф.²

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

² *Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН*

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

Предложена эффективная модель расчета протоколов квантовой томографии ионных кудитов, которая позволяет учитывать неидеальность задания параметров преобразований при проведении измерений. Представлено сравнение точности томографии ионных кудитов в условиях неидеальности задания параметров для стандартного метода и метода нечетких квантовых измерений. Разработанная модель позволяет получить оптимальный по количеству операций набор двухуровневых преобразований квантовых состояний кудитов.

Ключевые слова: кудит; квантовая томография; ионы в ловушке.

Одной из наиболее перспективных платформ квантовых вычислителей являются ионы в ловушках. На их основе можно создавать квантовые состояния, размерность которых равна или превышает два. Такие состояния называются кудитами. Квантовые устройства, работающие на кудитах, имеют более высокую достоверность операций, выполняемых в одном ионе [1], могут моделировать работу многокубитовой системы и повышают возможности масштабирования. Однако данное направление также сопряжено с рядом трудностей. Одной из таких трудностей является сложность построения измерения многоуровневого квантового состояния кудита.

Настоящая работа является развитием нашего исследования [2]. Основной целью была выбрана разработка эффективной модели измерений квантовых состояний ионных кудитов на базе известных протоколов томографии. Для этого был разработан алгоритм разложения унитарной матрицы произвольной размерности по двухуровневым унитарным преобразованиям, каждое из которых отвечает определенному оптическому переходу между основным и возбужденным состояниями. Кроме того, был разработан алгоритм расчета параметров разложения двухуровневой унитарной матрицы по операциям, реализуемым на ионной вычислительной платформе. Была выполнена оптимизация числа операций, необходимых для реализации заданной унитарной матрицы на основе измерительной схемы. Такой подход позволил сократить влияние погрешностей задания параметров преобразований.

Искомые алгоритмы были реализованы на языке программирования Python. Было проведено численное моделирование томографии ионных кудитов с использованием полученных протоколов. Было показано, что предложенное разложение соответствует ожидаемому протоколу измерений и позволяет обеспечить высокую точность реконструкции квантового состояния. Кроме того, было рассмотрено моделирование квантовой томографии в условиях наличия случайных отклонений параметров разложения. Было проведено сравнение точности восстановления квантовых состояний с использованием стандартного метода и метода нечетких

квантовых измерений. Было показано, что стандартный подход, не учитывающий ошибки в установке углов поворотов на сфере Блоха, отвечающих двухуровневым унитарным преобразованиям, приводит к насыщению точности томографии при увеличении объема выборки, в то время как подход на основе нечетких квантовых измерений приводит к неограниченному увеличению точности с ростом количества измерений

Работа выполнена в рамках проекта № 22-12-00263 Российского научного фонда.

Литература

1. Aksenov M.A., Zalivako I.V., Semerikov I.A. et al. Realizing quantum gates with optically addressable Yb⁺ 171 ion qudits // *Physical Review A*, 2023. Vol. 107. № 5. P. 052612.
2. Koksharov K.B., Bogdanov Y.I., Bogdanova N.A. et al. High-Precision Quantum Measurements of Qudits Taking into Account the Influence of Amplitude and Phase Relaxation // *Russian Microelectronics* 52 (Suppl 1), S363–S368 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063739723600632> (Published: 21 March 2024).



УДК 681.518.3

Измерительные решения для исследований и разработки в области квантовых технологий

Бараковский Ф. А., Маслов П. В.

АО «Акметрон»

109544, г. Москва, ул. Рабочая, 93, стр. 2

Приведен сравнительный анализ распространенных подходов к архитектуре измерительных решений в области квантовых технологий в качестве их преимуществ и недостатков относительно предъявляемым требованиям к области. Представлена новая система для контроля и измерения кубитов на открытой платформе PXI, обладающая большим потенциалом к масштабированию, упрощенному программированию сценариев измерений и контроля. Показаны варианты построения на практике измерительных комплексов с применением предлагаемой системы.

Ключевые слова: квантовые технологии; PXI; считывание и контроль кубитов; измерительные решения.

Хотя квантовые вычисления все еще находятся на этапе экспериментов, эта технология быстро прогрессирует и обещает множество интересных приложений. Тем не менее работа квантового компьютера требует решения множества сложных задач, которые становятся все сложнее по мере увеличения числа кубитов.

В последние годы роль модульных платформ для считывания и контроля кубитов при разработке квантовых компьютеров растет ввиду увеличения числа контролируемых кубитов в квантовых процессорах. В этом отношении, использование платформы PXI приводит к очень компактной реализации измерительных систем с генерирующими и оцифровывающими модулями, которые могут размещаться в одном шасси, что увеличивает их доступность и надежность. Решение, основанное на модулях PXI, позволяет легко увеличить количество генерирующих и оцифровывающих каналов. Другие компоненты системы, такие как релейные драйверы или модули синхронизации, также могут быть добавлены, если они доступны в виде плат PXI. Кроме того, спецификация шины PXI определяет специальные сигналы для полной синхронизации генератора и оцифровщика, а также других модулей. Это особенно важно, когда требуется когерентное семплирование сигналов.

Однако представленные пользователям измерительные платформы для квантовых измерений на базе PXI построены на базе уже разработанных производителями модулей для применения в совершенно других областях (телеком, РЛС, РЭБ, разработка электронных средств). Это приводит к тому, что в существующих решениях не достигается максимальная компактность притом, что масштабируемость таких систем только растет с увеличением потребности в контроле все большего количества кубитов [1]. Модули генераторов и оцифровщиков имеют форм-фактор 2U и 3U, а программирование таких модулей усложняется, так как в них необходимо учитывать количество выделяемой памяти на загружаемую форму волны, настройки режимов IQ-модуляции и другие параметры. Существуют статьи, в которых охарактеризованы некоторые PXI-оцифровщики и генераторы, например, [2, 3, 4], но найти публикацию, которая поможет выбрать измерительную

систему с наибольшим потенциалом к масштабированию при упрощении эксплуатации, трудно. Поэтому в этой статье представлены результаты сравнительного анализа нескольких популярных платформ для разработки квантовых компьютеров.

Представлен альтернативный вариант системы измерений и контроля кубитов, в котором каждый модуль выполняет конкретную функцию в отношении измерений — генерация импульсов по XY, по Z, посылка сигнала и считывания сигнала, при увеличении каналов в каждом модуле (8 каналов). При таком функционале модули обладают форм-фактором 1U, что позволяет вместить множество каналов в одном шасси. Рассмотрен вариант измерительной системы, обеспечивающей контроль до 128 кубитов в одном шасси. На примере алгоритмов показано упрощение программирования таких измерительных систем.

Литература

1. Möller M., Vuik C. On the impact of quantum computing technology on future developments in high-performance scientific computing // *Ethics and Information Technology*, 2017. 19. 10.1007/s10676-017-9438-0.
2. Overney F., Rufenacht A., Braun J.-P., Jeanneret B. and Wright P.S. Characterization of metrological grade analog-to-digital converters using a programmable Josephson voltage standard // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2011. Vol. 60. № 7. P. 2172–2177.
3. Rietveld G. et al. Characterization of a wideband digitizer for power measurements up to 1 MHz // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2011. Vol. 60. № 7. P. 2195–2201.
4. Kozioł M., Kaczmarek J. and Rybski R. Characterization of PXI-based generators for impedance measurement setups // *Proc. Conf. Precis. Electromagn. Meas. (CPEM)*, Paris, France, Jul. 2018. P. 1–2.



УДК 530.145

Формирование одиночных азот-вакансионных центров окраски в CVD-алмазе методом облучения высокоэнергетичными электронами

Калошин М. М.¹, Вергелес С. С.¹, к. ф.-м. н., Ф. А. С.¹, Маргушин Р. Е.¹,
Салказанов А. Т.¹, д. т. н., Каргин Н. И.¹, к. т. н., Кукин Н. С.², Бухтияров А. А.²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

MMKaloshin@mephi.ru

² АНО «Институт инженерной физики»

142210, г. Серпухов, Большой Ударный пер., 1А, стр. 1

Проведено исследование, направленное на формирование одиночных NV-центров в CVD-слое алмаза на нескольких образцах с одинаковым содержанием азота и разной дозой облучения высокоэнергетическими электронами и последующим отжигом. С помощью конфокальной микроскопии были получены спектры областей с NV-центрами, получен спектр ОДМР (оптически детектируемый магнитный резонанс) на одиночных NV-центрах.

Ключевые слова: ОДМР; NV-центр; рост алмазов.

Азотно-вакансионный центр окраски (NV) в алмазе представляет собой квантово-оптическую систему; которая показала высокий потенциал в качестве чувствительного магнитометра при комнатной температуре [1]. Созданы портативные магнитометры на NV-центрах; которые объединяют оптическое возбуждение; микроволновое управление и детектирование флуоресценции в компактных устройствах [2]. Ключевым аспектом для дальнейшего развития технологий и улучшения их квантовых свойств необходимо контролируемое получение одиночных NV-центров. Одним из способов получения центров окраски в алмазе является метод облучения высокоэнергетичными электронами [3].

В качестве рабочих образцов использовались подложки синтетического алмаза монокристалла IIa-типа в количестве 3 шт., выращенные методом HPHT, с концентрацией примесей $\sim 5 \cdot 10^{-2}$ м.д., методом CVD (осаждения из газовой фазы) были получены алмазные пленки. Толщина образцов после химико-механическое полировки пленок алмаза составила от 10 до 18 мкм, в зависимости от образца.

Таблица 1. Параметры и характеристики

№ Об-разец	Ориентация кристаллической решетки	Толщина подложки, мкм	Толщина CVD, мкм	Энергия облучения (МэВ)	Доза облучения (e/cm ²)	Время термического отжига (Мин)
1	[111]	345	~10-12	1.8	1 10 ¹³	10
2	[111]	328	~10-12	1.8	1 10 ¹⁴	10
3	[111]	388	~16-18	1.8	1 10 ¹⁵	10

Исследование образцов для поиска одиночных NV-центров осуществлялось методом построения флуоресцентной карты поверхностного слоя пленки алмаза с помощью конфокальной микроскопии. В образце № 3 с дозой облучения $1 \cdot 10^{15}$ е/см² получены локализованные одиночных NV-центры. Идентификация NV-центров осуществлялась с помощью измерения спектров флуоресценции и оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР).

В результате, разработана методика облучения и термического отжига алмазных образцов, которая позволяет получать высокую концентрацию одиночных NV-центров. Поскольку, естественное содержание ¹³C в алмазе составляет 1,1 %, большое содержание одиночных NV-центров позволяет повысить шансы найти NV-центр, который содержит близко расположенный атом ¹³C, образуя при этом гибридную квантовую систему NV-¹³C, которая представляет интерес в области разработки квантовых сенсоров и квантовых вентиляей.

Литература

1. Jensen K. et al. Cavity-enhanced room-temperature magnetometry using absorption by nitrogen-vacancy centers in diamond // Physical review letters, 2014. 112.16.
2. Esmacili S. et al. Evolution of quantum spin sensing: From bench-scale ODMR to compact integrations // APL Materials, 2024. 12 (4).
3. Zaitsev A. M., Moe K. S. and Wang W. Diamond Relat. Mater., 2017. 71, 38.

УДК 53.02

Объединение гейтов и увеличение размерности фреймов: сравнение двух подходов минимизации негативности квантовых цепочек

Куликов Д. А.^{1,2}, Яшин В. И.^{1,3}, Федоров А. К.^{1,2,4}, Киктенко Е. О.^{1,3,4}

¹ *Российский квантовый центр
121205, г. Москва, Территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1*

² *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

³ *Математический институт им. В. А. Стеклова РАН
119991, г. Москва, ул. Губкина, 8*

⁴ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1*

Исследованы два подхода к уменьшению негативности цепочек в квазивероятностных представлениях. Проведено сравнение этих подходов с точки зрения негативности и размерности квазистохастических матриц гейтов. Показано, что увеличение размерности фреймов является более выгодной стратегией минимизации негативности.

Ключевые слова: квазивероятностное представление; квантовые вычисления; квантовые цепочки; негативность.

Квантовые компьютеры превосходят классические в ряде вычислительных задач. Однако остается открытым вопрос о том, что является ресурсом для квантового превосходства. Наиболее подходящим кандидатом является негативность [1], так она кажется наиболее общим ресурсом и применима к любым квазивероятностным представлениям квантовой механики.

Квазивероятностное представление — это подход к описанию квантовой механики с помощью квазистохастических матриц, действующих на квазивероятностные распределения. Благодаря этому подходу можно симулировать квантовые цепочки с помощью метода Монте Карло, однако сложность симуляции определяется негативностью цепочки [2].

В ходе настоящей работы был разработан алгоритм поиска представления (фрейма), в котором негативность заданной квантовой цепочки минимальна. Было показано, что негативность цепочки уменьшается с увеличением размерности представления [3]. Однако, чем больше размерность представления, тем большего размера матрицы требуется хранить в памяти компьютера.

Второй способ уменьшить негативность — объединение гейтов. Однако при объединении гейтов, действующих на разные кубиты, размер итоговой матрицы гейта будет увеличиваться.

Описанные подходы уменьшения негативности сравнивались с точки зрения размера квазистохастических матриц цепочки. Главным результатом работы является демонстрация того, что при больших размерах матриц и наличии декогеренции

в системе более эффективным подходом является увеличение размерности представления.

Работа была поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 5 октября 2021).

Литература

1. Veitch V., Ferrie C., Gross D., Emerson J. Negative quasi-probability as a resource for quantum computation // New Journal of Physics, 2012. Vol. 14. № 11. P. 113011.
2. Koukoulekidis N. et al. Faster Born probability estimation via gate merging and frame optimization // Quantum, 2022. Vol. 6. P. 838.
3. Kulikov D.A. et al. Minimizing the negativity of quantum circuits in overcomplete quasiprobability representations // Physical Review A, 2024. Vol. 109. № 1. P. 012219.



УДК 67.02

Модуль считывания на базе параметрического криоусилителя с согласованием импеданса

Москалева Д. А.^{1,2}, Смирнов Н. С.^{1,2}, к. т. н., Москалев Д. О.^{1,2}, Матанин А. Р.^{1,2}, Иванов А. И.^{1,2}, Баклыков Д. А.^{1,2}, Телеганов М. И.¹, Полозов В. И.^{1,2}, Кугук А. К.¹, к. т. н. Малеванная Е. И.^{1,2}, Ечистов В. В.^{1,2}, Коробенко И. С.¹, к. т. н. Родионов И. А.^{1,2}

¹ НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

ezenkovada@bmstu.ru

² ВНИИА им. Н. Л. Духова

127030, г. Москва, ул. Суцеская, 22

Разработан модуль считывания на базе криоусилителя для работы со сверхпроводниковыми квантовыми сопроцессорами. Модуль обеспечивает коэффициент усиления более 15 дБ в рабочей полосе более 600 МГц, при средней мощности насыщения –105 дБм, а также шумовой температуре системы, не превышающей 300 мК.

Ключевые слова: сверхпроводниковые квантовые вычисления; параметрические усилители; квантовый предел.

Широкополосные параметрические усилители находят широкое применение в таких сферах как астрофизика, создание детекторов кинетической индуктивности, в квантовой оптике для создания квантовых генераторов и радаров, а также в квантовых вычислениях. Благодаря использованию криогенных параметрических усилителей в измерительном каскаде при считывании состояний сверхпроводниковых кубитов удастся значительно повысить точности операций для многокубитных сопроцессоров. Однако с увеличением числа кубитов на схеме предъявляются все более жесткие требования к ширине полосы и коэффициенту усиления параметрического усилителя.

Выделяют два типа широкополосных параметрических усилителей: параметрические усилители с согласованием импеданса, а также усилители бегущей волны [1]. Несмотря на то, что параметрические усилители бегущей волны позволяют обеспечить ширину полосы усиления в несколько гигагерц при усилении более 15 дБ, их шумовая температура значительно превышает стандартный квантовый предел. Кроме того, эти устройства требуют изготовления нескольких сотен идентичных элементарных ячеек, а также обеспечения согласования импеданса и фазы. В связи с этим предпочтение отдается параметрическим усилителям с согласованием импеданса.

В работе представлен разработанный модуль считывания для работы со сверхпроводниковыми квантовыми сопроцессорами, состоящий из СВЧ циркулятора и изолятора, ИК-фильтра, малошумящего НЕМТ усилителя, а также комплекта СВЧ кабелей. Ключевым элементом модуля является разработанный широкополосный параметрический криоусилитель [2]. Усилитель представляет собой двухполосный согласующий контур Чебышева с параллельным соединением резонаторов. В качестве элемента, регулирующего нелинейную индуктивность в схеме, для разработанных устройств был выбран сверхпроводниковый асимметричный

индуктивный элемент (SNAIL). Ключевым преимуществом SNAIL в сравнении с другими элементами на джозефсоновских переходах является зависимость квадратичной и кубической нелинейностей от внешнего магнитного потока, что позволяет настраивать режим работы усилителя в зависимости от выбора рабочей точки. Устройство реализовано на сосредоточенных элементах, включающих плоскопараллельные конденсаторы, а также планарные катушки индуктивности. Работая в режиме 3-х волнового смещения с накачкой потоком, мы экспериментально продемонстрировали средний коэффициент усиления более 15 дБ в полосе пропускания 600 МГц, а также среднюю мощность насыщения -105 дБм с квантово-ограниченными шумовыми характеристиками.

Литература

1. Kaufman R., White T., Dykman M. I., Iorio A., Sterling G., Hong S., Naaman O. et al. Josephson parametric amplifier with Chebyshev gain profile and high saturation // *Physical Review Applied*, 2023. Vol. 20. № 5. P. 054058.2.
2. Ezenkova D., Moskalev D., Smirnov N., Ivanov A., Matanin A., Polozov V., Rodionov I. et al. Broadband SNAIL parametric amplifier with microstrip impedance transformer // *Applied Physics Letters*, 2022. Vol. 121. № 23.



УДК 004.716

Организация многопользовательских квантовых сетей с промежуточными доверенными узлами

Сантьев А. А.¹, Яшин Д. А.¹, Рогов Р. И.¹, Дубинский А. Р.², Бородин В. С.²,
Новоторжин А. В.², Алексеев А. Л.¹

¹ ООО «СМАРТС-Кванттелеком»

199178, г. Санкт-Петербург, В.О., блиния, 59, корп. 1, лит. Б
info@quanttelecom.ru

² ООО «Амикон»

117587, г. Москва, Варшавское ш., 125, стр. 1
info@amicon.ru

Рассмотрены перспективы развития систем квантового распределения ключей для построения магистральных и локальных квантовых сетей смешанной топологии. Обсуждаются вопросы, связанные с модернизацией методов управления ключами в средствах криптографической защиты информации, распределяющих квантовозащищенные ключи. Предложены направления для модернизации инфраструктуры квантовых сетей.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей; квантовые ключи; квантовозащищенные ключи; квантовая сеть.

При построении квантовых сетей для преодоления ограничения по дальности функционирования сетей квантовой рассылки ключей (КРК) используется подход на основе доверенных промежуточных опорных узлов, позволяющий формировать квантово-защищенные ключи между опорными узлами сети на основе квантовых ключей. Таким образом, защита данных в квантовых сетях может обеспечиваться не только квантовыми ключами, но и квантовозащищенными ключами. Квантовые сети на основе данного принципа получили широкое развитие, особенно в Китае и России, однако разработчики квантовых сетей находятся в поиске возможных подходов к реализации цифровых сервисов, безопасность которых основывается криптографическими примитивами, использующими квантовые или квантовозащищенные ключи.

В настоящий момент комплексный подход о том, какой должна быть архитектура полноценных платформенных сервисов, в которых защита предоставляемых цифровых сервисов основана на применении технологии квантового распределения ключей, только формируется, в том числе в ряде научных публикаций [1–4].

В работе представлены опыт разработки и практические достижения по построению магистральных и локальных квантовых сетей смешанных топологий на промышленном оборудовании с учетом существующего опыта разработки систем квантового распределения ключей и сопряженных шифраторов. В том числе рассматриваются вопросы организации ключевого транспорта и формирования квантовозащищенных ключей, принципы удаленного распределенного управления и мониторинга, программного и аппаратного резервирования компонентов, предоставления сервиса и услуг на базе квантовых сетей.

Литература

1. Scarani V. et al. The security of practical quantum key distribution // Rev. Mod. Phys. APS, 2009. Vol. 81. № 3. P. 1301.
2. Alléaume R. et al. Using quantum key distribution for cryptographic purposes: a survey.
3. Van Meter R. Quantum Networking // Quantum Networking, 2014. Vol. 9781848215. 1–333 p.
4. Сантьев А. А. Методы оптимизации структуры квантовых сетей для обеспечения централизованного управления ключами // Вестник современных цифровых технологий, 2023. — № 15. — С. 12–19.

УДК 004.2

Реализация базовых алгоритмов квантовых вычислений на ионной платформе

Колачевский Н. Н.^{1,2}¹ *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53*² *Международный центр квантовых технологий*

Доклад посвящен текущему прогрессу в области создания российского ионного квантового компьютера, увеличения числа адресуемых кубитов, новым техническим решениям и повышению качества операций. При выполнении работ в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям был создан квантовый процессор на основе трехмерной ловушки Пауля, позволяющий адресовать и считывать до 25 кубитов (50 кубитов) с помощью лазерных полей. Для достижения этого показателя (максимального на сегодня в России) при полной связанности между парами ионов ($Yb-171$) мы были вынуждены снизить качество операций: достоверность однокубитной операции (1Q) составило 99,85%, а достоверность двухкубитной (2Q) — около 90% на цепочке из 25 ионов. Для реализации важных квантовых алгоритмов использовались более короткие цепочки — 10 ионов (20 кубит), что обеспечивает достоверность 99,95% (1Q) и 95% (2Q) соответственно, позволяя реализовывать достаточно глубокие квантовые алгоритмы. Нами был реализован ряд алгоритмов, нацеленных на решение практических задач, таких как: квантовый алгоритм приближенной оптимизации для факторизации чисел (15 двухкубитных операций между шестью ионами), реализован кубитный гейт Тоффоли, позволяющий существенно улучшить качество операций (использовалось до 6 кубит), трехкубитный алгоритм Гровера, алгоритмы распознавания образов и квантовой химии. Увеличение качества операций является одной из наиболее важных задач на сегодняшний день. Повышение достоверности 2Q операций до 99% на системе из 50–100 кубитов позволяют перейти к решению важных для практики алгоритмов на квантово-классических системах, в частности, для решения задач квадратичной оптимизации.

УДК 621.383

Современное состояние и направления развития фото- и оптоэлектроники инфракрасного диапазона в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»

д. т. н. Бурлаков И. Д.^{1,2}, Старцев В. В.¹

¹ АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

² МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Рассмотрены основные тенденции развития современных технологий фотоэлектроники и полупроводниковых фоточувствительных материалов для инфракрасных областей спектра, а также современное состояние и основные направления развития фото- и оптоэлектроники в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион».

АО «НПО «Орион» успешно преодолел порог 30-летия со дня присвоения статуса Государственного научного центра Российской Федерации Постановлением Правительства Российской Федерации от 5 июня 1994 г. № 649, полностью оправдав идею создания научных организаций нового типа для сохранения ведущих научных центров мирового уровня, быстрого развития научного потенциала страны в области фундаментальных и прикладных исследований и подготовки высококвалифицированных научных кадров, воплотившуюся в Указе Президента Российской Федерации от 22 июня 1993 г. № 939.

Одними из основных глобальных тенденций инфракрасной фотосенсорики продолжают оставаться разработка и совершенствование:

- одно- и многоспектральных охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (МФПУ), в том числе третьего поколения и мегапиксельных форматов, повышающих вероятность обнаружения и распознавания объектов и другие тактико-технические характеристики систем;
- фоточувствительных гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур различной архитектуры с разными функциональными слоями (хВп, T2SL и др.), позволяющих создавать МФПУ с повышенными основными фотоэлектрическими и эксплуатационными характеристиками, в том числе с повышенной относительно «азотной» рабочей температурой охлаждения, обеспечивающей снижение весо-габаритных параметров и потребляемой мощности;
- твердотельной фотоэлектроники коротковолнового ИК-диапазона для области спектра 1–3 мкм как на основе традиционных структур с активными слоями InGaAs и КРТ, так и с активными слоями из коллоидных квантовых точек;
- сверхпротяженных фотоприемных устройств на основе стыкуемых ВЗН-модулей с количеством каналов более 10 тысяч и числом стадий ВЗН-накопления 8–10 и крупноформатных матриц (до 6кx6к элементов) коротковолнового, средне- и длинноволнового ИК-диапазонов для космических применений.



Среди наиболее важных достижений последнего времени следует отметить создание в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» научно-технических и конструктивных решений при создании и освоении инновационных промышленных технологий:

- МФПУ на основе фотодиодов из антимонида индия на средневолновую область ИК-спектра 3-5 мкм формата 640×512 элементов (шаг 15 мкм) с формирователем сигналов изображения. Ведется крупносерийный выпуск этих изделий в обеспечение оптико-электронной аппаратуры бронетанковой техники;
- малогабаритных ИК-камер коротковолнового спектрального диапазона на основе матричных фотосенсоров из InGaAs для оборонных и гражданских применений в промышленности, медицине, искусствоведении, на транспорте и др.;
- оптико-электронных модулей (ОЭМ) средневолнового ИК-диапазона спектра на основе отечественного МФПУ формата 640×512 элементов, в том числе с вариообъективом и электронным блоком обработки, формирующим видеосигнал тепловизионного изображения. ОЭМ могут использоваться для решения различных задач, таких как охрана особо важных объектов и акваторий, контроль утечек тепла, вождение транспортных объектов в условиях плохой видимости и т. п.
- многорядных ИК ФПУ на основе КРТ, обеспечивающих работу в режиме ВЗН и внедренных в оптико-электронную аппаратуру космического базирования для решения специальных и гражданских задач. Информация о поверхности и происходящих процессах в атмосфере, получаемая аппаратурой в виде изображений полусферы Земли в различных диапазонах ИК-области спектра, обладает новым, ранее недостижимым качеством. Это позволило впервые в России создать группировку космических аппаратов непрерывного наблюдения для решения задач гидрометеорологии, а также информационного обеспечения экологии, хозяйственной и транспортной деятельности арктического региона. Аналогичная аппаратура используется для обнаружения лесных пожаров, оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций. Следует также отметить разработку научно-технических и конструктивных решений при создании инновационного многорядного крупноформатного ИК ФПУ с числом элементов более 200 тысяч на основе стыкуемых ВЗН-фотомодулей формата 1024×10 элементов из КРТ для широкополосных сканирующих систем.

В сложившейся сложной геополитической обстановке для достижения необходимого уровня национальной безопасности и обороны страны значительно возросла роль инфракрасной фото- и оптоэлектроники, обеспечивающей возможности и тактико-технические характеристики практически всех видов ВВСТ. Фото- и оптоэлектроника также широко используется в науке, промышленности, космической и других отраслях.

К настоящему времени в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» получены впечатляющие результаты в развитии критических технологий приоритетного научного направления федерального уровня «Информационно-телекоммуникационные системы», включая фотонику, фото- и оптоэлектронику, микро- и наноэлектронику. Научно-технические и технологические разработки ученых и специалистов ГНЦ способствуют укреплению обороноспособности и технологического суверенитета нашей страны.

УДК 621.3.049

Перспективы создания высокотемпературных ИК детекторов на основе материалов A^3B^5 содержащих сурьму

Кривобок В. С.^{1,2}, Пашкеев Д. А.¹, Клековкин А. В.¹, Минаев И. И.¹,
Ерошенко Г. Н.¹, Савин К. А.¹, Муратов А. В.¹, Гончаров А. Е.², Николаев С. Н.¹

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

er-grig@mail.ru

² АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

Обсуждается возможность создания гибридных фотоприемных устройств для диапазона 3–5 мкм, в которых для передачи возбуждения в полупроводниковую часть детектора используется фотонно-кристаллический резонатор.

В современной литературе активно обсуждаются детекторы ИК излучения, в которых падающее излучение сначала преобразуется в поверхностную электромагнитную волну, которая, затем поглощается полупроводниковой гетероструктурой, см. напр. [1, 2]. Данный подход подразумевает разработку гибридных систем на основе фотонно-кристаллического резонатора (ФКР), совмещенного с полупроводниковым фоточувствительным элементом. Сочетание поглотителя на основе барьерно-диодной структуры (хВп в англоязычной литературе) с резонаторным вводом излучения обеспечивает не только радикальное повышение чувствительности и/или рабочей температуры фотоприемных устройств (ФПУ), но и реализацию систем с селективной чувствительностью к поляризации детектируемого излучения. Основная идея состоит в том, что при использовании хВп архитектуры ФПУ темновой ток, в основном, определяется диффузионным механизмом. В этом случае темновой ток прямо пропорционален толщине фоточувствительной области барьерно-диодной гетероструктуры. В обычном исполнении уменьшение толщины фоточувствительной области нецелесообразно, так как приводит к уменьшению поглощения и падению квантовой эффективности. В то же время, использование резонатора позволяет достичь приемлемого поглощения (квантовой эффективности) в тонких поглощающих слоях. Это обеспечивает резкое подавление диффузионного тока, уменьшение связанных с ним шумов при сохранении квантовой эффективности ФПУ на надлежащем уровне.

Предложенные в литературе дизайны гибридных ФПУ достаточно сложны для реализации, требуют, в частности, электронной литографии высокого разрешения и обычно исключают переход к матричному исполнению. Основной целью данной работы является разработка адаптивного дизайна гибридного ФПУ для спектрального диапазона 3–5 мкм, который с одной стороны не требует электронной литографии высокого разрешения, с другой стороны допускает переход к матричному исполнению массива фоточувствительных элементов.

Литература

1. Jeon J., Seo Y., More V. M., Kim H., Kim J. S., Kim Y., Lee S. J. // *Materials Today Nano*, 2022. Vol. 18. P. 100221.
2. Petluru P., Muhowski A. J., Kamboj A., Mansfield N. C., Bergthold M., Shaner E. A., Klem J. F., Wasserman D. // *Applied Physics Letters*, 2023. Vol. 22. P. 021101.



УДК 621.3

Конструктивно-технологические аспекты проектирования матричного микроболометрического детектора с шагом элементов 12 мкм

Шилейко Н. А., Москвичев В. Ю., Соколов К. В., Хафизов Р. З.

АО «ОКБ «Астрон»

140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1

Рассмотрены конструкторско-технологические аспекты проектирования мегапиксельных матричных микроболометрических детекторов (ММБД) с шагом элементов 12 мкм. Приведены зависимости функциональных параметров ММБД от оптических и теплофизических свойств МЭМС структур чувствительных элементов. Представлены примеры расчетов, проведенных в целях оптимизации конструктивных параметров ММБД.

Ключевые слова: ИК излучение; конструктивные параметры; матричные микроболометрические детекторы (ММБД); микроэлектромеханические системы (МЭМС); оптико-электронные системы (ОЭС).

Развити разработок микроболометрических матричных детекторов для тепловизионных оптико-электронных систем (ОЭС) последние годы направлено на создание больших ИК матриц, характеризующихся высоко разрешающей способностью за счет уменьшения шага пикселей вплоть до 12 мкм при сохранении их высоко чувствительности. Необходимость движения это направлено обусловлено актуальностью решения задачи детектирования низкоконтрастных целей на большой дальности.

Проектированы такие детекторы требуемые решения задачи конструктивно-технологически, проведена аналитический расчет моделирования целью достижения функциональных характеристик ММБД, отвечающих целевым тактико-техническим требованиям.

Простое масштабирование топологии ММБД при переходе к малым размерам элементов не обеспечивает сохранения параметров чувствительности связи существенным изменением теплофизических оптических параметров пиксельной МЭМС-структур, отвечающих за преобразование ИК излучения.

В работе представлены варианты топологических решений формирования конструкции пикселя шагом 12 мкм, разработанные с использованием программного продукта Essential Macleod MathCad, также результаты моделирования оптических параметров МЭМС-структур, реализующих возможность улучшения характеристик поглощения ИК излучения.

УДК 621.383.4/5

Технология прецизионного прессования линз. Состояние и перспективы освоения в России

к. т. н. Полесский А. В.^{1,2}, Семенченко Н. А.¹, Сайкина Т. С.¹, Старцев В. В.¹,
к. х. н. Семенча А. В.³, к. т. н. Архипова Л. Н.⁴, Щербаков К. В.⁴

¹ АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
orion@orion-ir.ru

² МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б

⁴ АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»,

192171, г. Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, 36, корп. 1

Представлены возможности технологии массового производства асферических линз новым для России методом — методом прецизионного прессования, текущее состояние и перспективы освоения в России.

Ключевые слова: объективы; прецизионное прессование; оптические детали; линзы; асферика; микролинзы; силикатные стекла; халькогенидные стекла.

В настоящее время в России для производства объективов наиболее широко используется «классическая» технология получения линз, т. е. получение линз методом механической обработки с применением абразивных материалов (шлифовки, полировки и доводки оптических поверхностей). Недостатками данной технологии является: невозможность получения асферических поверхностей, технические сложности получения линз диаметром менее 10 мм и сравнительно долгий технологический цикл производства линзы.

Технология прецизионного прессования линз в мире появилась в 2000-годах. Она позволяет изготавливать асферические линзы и другие оптические детали сложной формы из силикатного и халькогенидного стекла методом прессования. Ранее для получения оптических элементов использовались технологии молирования, горячего прессования и литья, но они (в отличие от технологии прецизионного прессования) не позволяли получать сразу готовые оптические элементы, не требующие дополнительной обработки оптических поверхностей [1].

С 2022 года АО «НПО Орион» выполняет технологические работы направленные на разработку объективов для диапазона 0,4–2 мкм и 8–14 мкм с линзами, получаемыми методом прецизионного прессования.

В ходе работ решается комплексная проблема разработки технологии прецизионного прессования, начиная от технологии производства исходных оптических материалов (силикатных и халькогенидных стекол) со специальными свойствами и технологии прецизионного прессования линз, до технологии сборки и контроля качества готовой продукции.

В работе приведены текущий уровень разработки следующих технологий:

- производства четырех новых для России материалов — халькогенидных стекол пригодных для получения линз для объективов диапазона 8–14 мкм необходимых для комплектации микролометрических камер;

- производства пяти новых для России материалов — силикатных стекол пригодных для получения линз для объективов диапазона 0,4–2 мкм необходимых для комплектации дневно-ночных оптико-электронных приборов, работающих в видимом, ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах;
- получения линз методом прецизионного прессования из силикатного и халькогенидного стекла.

Также в работе приведены результаты разработки оптических схем объективов с использованием линз, получаемых методом прецизионного прессования и результаты испытаний макетов объективов и результаты технического сравнения объективов полученных по классической технологии и по технологии прецизионного прессования на примере объективов для ПНВ.

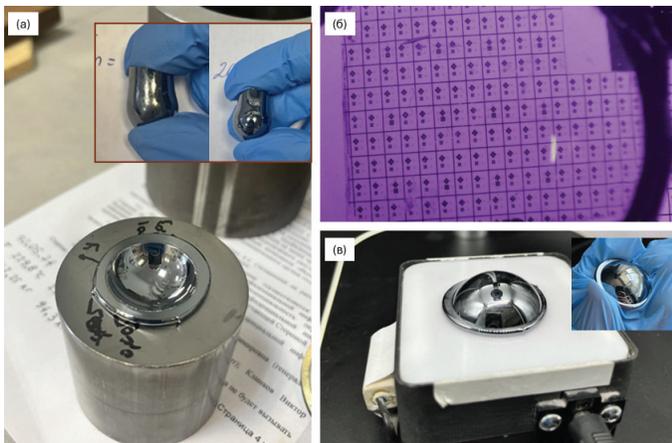


Рис. 1. Результаты отработки технологи процесса получения линзы методом прецизионного прессования: исходная заготовка и линза их халькогенидного стекла в пресс-форме (а), результаты экспресс-проверки линзы на пузырьность, бессвильность и однородность оптического пропускания (б); приспособление для экспресс-контроля линзы (в)

Литература

1. Maschmeyer R. O., Andrysick C. A., Geyer T. W., Meissner H. E., Parker C. J. and Sanford L. M. Precision Molded Glass Optics // Applied Optics, 1983. Vol. 22. № 16. P. 2410–2412.

УДК 621.737.826

Полупроводниковые лазеры для опто- и микроэлектронных приложений

Пихтин Н. А.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
nike@hpld.ioffe.ru

В докладе будут представлены результаты разработок ФТИ им. А. Ф. Иоффе в области полупроводниковых лазеров в сравнении с современным состоянием дел в Российской Федерации и мире.

Ключевые слова: МОС-гидридная эпитаксия; молекулярно-пучковая эпитаксия; торцевые лазерные диоды; вертикально-излучающие лазеры.

Будут обсуждаться конструкции торцевых (с резонатором Фабри — Перо) лазерных диодов на основе квантоворазмерных гетероструктур из Al-In-Ga-As-P твердых растворов, выращенных на подложках GaAs (диапазон длин волн излучения 630–1100 нм) [1–5] и InP (диапазон длин волн излучения 1260–2000 нм) [6, 7] методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксией) (индустриальный партнер — АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха). Главное внимание будет уделено требованиям к их основным выходным электрооптическим характеристикам — оптическая мощность, КПД, расходимость, спектральная и пространственная яркость, температурная стабильность, надежность (срок службы) — в зависимости от конкретных применений. В этой связи будут рассмотрены технологические процессы эпитаксиального роста гетероструктур, их постростовой обработки (планарные технологии), технологии монтажа кристаллов и их характеристики. Будут приведены достигнутые выходные параметры разработанных и изготовленных многомодовых и одномодовых торцевых полупроводниковых лазеров, работающих при непрерывной и импульсной (длительность от 1 до 100 нс) накачке [1–7].

Будут представлены результаты разработок в области создания вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) на основе InGaAs/AlGaAs гетероструктур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В последние годы в рамках совместных работ с индустриальным партнером АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор» ведутся разработки ВИЛ для атомных сенсоров на атомах ^{133}Cs . Созданные лабораторные ВИЛ спектрального диапазона 894,6 нм в диапазоне рабочих температур до +70С демонстрируют субмиллиамперные пороговые токи, максимальную выходную мощность до 2,5 мВт, одномодовую генерацию с фактором подавления мод высшего порядка более 30 дБ и фиксированное направление линейной поляризации выходного излучения с фактором подавления ортогональной поляризации ~20 дБ [8, 9]. По своим характеристикам разработанные приборы не уступают лучшим мировым аналогам и прошли успешную предварительную апробацию для использования в компактных квантовых стандартах частоты и перспективных ядерных магнитных гироскопах.

Литература

1. Шамахов В. В. и др. Technologies, 2023. Vol. 11. 4, ArtNo: #89.

2. Kirichenko Yu. et al. *Nanomaterials*, 2023. Vol. 13. 20. ArtNo: #2746.
3. Подоскин А.А. и др. // *ФТП*, 2024. — 58 (1). — С. 42–48.
4. Veselov D. A. et al. // *Semicond. Sci. Technol.*, 2021. 36 (11). ArtNo: 115005.
5. Гаврина П. С. и др. // *Квант. электроника*, 2021. — 51 (2). — С. 129–132.
6. Волков Н.А. и др. // *Квант. электроника*, 2021. — 51 (4). — С. 283–286.
7. Святогоров В. Н. и др. // *Квант. электроника*, 2021. — 51 (10). — С. 909–911.
8. Maleev N. A. et al. // *Gyroscopy and Navigation*, 2018. Vol. 9. P. 177–182.
9. Blokhin S. A. et al. // *Quantum Electronics*, 2019. 49, 187.

УДК 621.373, 621.383

Полупроводниковые лазеры и фотоприемники спектрального диапазона 1300–2000 нм**Ладугин М. А., Иванов А. В., Лобинцов А. В., Сапожников С. М.,
Мармалюк А. А., Кузнецов Е. В.***АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха»
117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1
LaduginMA@niipolyus.ru*

Спектральный диапазон 1300–2000 нм привлекателен для решения широкого круга задач, включая передачу информации по волоконно-оптическим линиям связи и создание лазерных приборов, безопасных для глаз человека. Для изготовления полупроводниковых лазеров и фотоприемников указанного спектрального диапазона широко используются полупроводниковые гетероструктуры на основе InP. В работе обсуждаются различные подходы, направленные на совершенствование выходных характеристик таких приборов, в первую очередь, за счет вариации конструкции гетероструктур.

Ключевые слова: лазерный диод; фотоприемник; ИК-диапазон; гетероструктура.

На сегодняшний день рассмотрено влияние конструкции волноводных слоев различных типов на особенности функционирования полупроводниковых лазеров.

Представлены результаты создания излучателей с упруго-напряженными квантовыми ямами InGaAs/AlGaInAs, способствующие повышению выходной мощности приборов. Тщательный контроль упругих напряжений позволяет создавать высокоэффективные лазеры с длиной волны генерации, сдвинутой в длинноволновую область (1900–2000 нм).

Рассмотрено применение периодических оптически связанных волноводов для сужения диаграммы направленности лазеров рассматриваемого спектрального диапазона. Приведены результаты создания одномодовых лазеров и одночастотных РОС-лазеров с боковой брэгговской дифракционной решеткой.

Продемонстрированы данные сравнительного анализа фотоприемников на основе классических p-i-n структур и однозарядных (uni-traveling-carrier photodiode) структур. Показаны преимущества и недостатки каждой из конструкций. Затронуты вопросы формирования гетероструктур для фотоприемников со сдвинутой в длинноволновую область границы чувствительности.

Обсуждены перспективы развития данных направлений.



УДК 535.643.8

Перспективные OLED микродисплеи с интегрированными блоками и настраиваемыми алгоритмами обработки изображения

Забабурин А. Ю.², Морозов А. А.¹, Нуриев А. В.^{1,3}, к. т. н., Стахарный С. А.¹, Шипицин Д. С.², к. ф.-м. н.

¹ АО «ЦНИИ «Циклон»

107076, г. Москва, Шелковское ш., 77

s.staharnyj@cyclone-jsc.ru

² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Проектирование перспективной линейки OLED микродисплеев с кремниевой СБИС управления проводится с учетом исследований качества изображения на экране микродисплея в зависимости от физических свойств органических светодиодов. Дополнительные встроенные блоки обработки и преобразования изображения разработаны с учетом потенциальных применений в аппаратуре в целях снижения затрат на разработку и комплектующие, снижения энергопотребления устройства в целом. Приведен перечень интегрированных блоков обработки изображения, алгоритмы их настройки для получения необходимого и наиболее информативного визуального отображения на экране OLED микродисплея в зависимости от назначения и режима работы устройства.

Ключевые слова: OLED; Si-OLED; microdisplay; VLSI; image display; органические светодиоды; ОСИД; микродисплеи; кремниевые СБИС; средства отображения информации.

На сегодняшний день OLED технология становится доминирующей в индустрии основы современных средств отображения информации (СОИ) — плоскочастотных дисплеев. Отдельным классом данных устройств являются OLED микродисплеи с кремниевой СБИС управления, применяемые в различных окологлазных СОИ индивидуального типа (ИСОИ) с моно- и бинокулярной оптической схемой. Данные ИСОИ позволяют решать большой круг задач, в том числе специфических где необходима предварительная обработка изображения, выявляющая наблюдаемые объекты и их свойства на окружающем фоне. Для этих целей в аппаратуре применяются внешние блоки на основе процессоров или ПЛИС с необходимой схемой обвязки этих микросхем. Такое решение усложняет процесс разработки, увеличивает количество комплектующих изделий, а главное сильно увеличивают энергопотребление (около 200 мВт), что может быть критично в портативной технике, где критичным является ресурс работы от аккумуляторной батареи.

Разрабатываемые OLED микродисплеи имеют интегрированные блоки обработки и преобразования изображения с конфигурируемыми по I2C интерфейсу алгоритмами функционирования. Перечень встроенных блоков включает:

- блок гамма-коррекции видеосигнала;
- блок инвертирования видеосигнала;

- блок псевдоцветной визуализации видеосигнала;
- блок цветокоррекции видеосигнала;
- блок бинаризации с глобальным порогом;
- блок монохромной визуализации видеосигнала.

Разработка блоков выполнена на основе исследований физических свойств органических светодиодов и пиксельных ячеек кремниевой СБИС управления, выполнена по отечественной библиотеке элементов технологии КМОП 180 нм завода АО«Микрон». Блоки могут индивидуально активироваться и использоваться как по отдельности, так и в определенной последовательности для достижения требуемого результата в зависимости от приложения устройства. Энергопотребление встроенных блоков не превышает 2 мВт, а понятный алгоритм работы существенно облегчает процесс разработки устройств с специализированными функциями. В работе подробно представлены принципы и алгоритмы настройки преобразования входного цифрового видеосигнала для получения наиболее информативного визуального отображения на экране OLED микродисплеев, приведены примеры обработки изображения.

Конструкция и топологические решения OLED микродисплеев с интегрированными в СБИС управления блоками и настраиваемыми алгоритмами обработки изображения защищены зарегистрированными правами на результаты интеллектуальной деятельности.

Литература

1. Забабурин А. Ю., Нуриев А. В., Стахарный С. А., Шипицин Д. С. Тонкая настройка качества изображения для вывода на экране OLED микродисплеев с кремниевой СБИС управления // Сборник тезисов 9-й Научной конференции «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-13-22.
2. Усов Н. Н., Стахарный С. А. Органические светодиоды // Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. — М.: «Светотехника», 2019. — С. 47–60.
3. Нуриев А. В., Стахарный С. А., Усов Н. Н. Гамма-коррекция полноцветных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов // Вестник МГОУ. DOI: 10.18384-2310-7251-2020-3-00-00.
4. Дарвин Д. О., Забабурин А. Ю., Ильин С. А., Илюшкин Т. Ю., Ласточкин О. В., Нуриев А. В., Стахарный С. А., Титов А. И., Шипицин Д. С. Семейство полноцветных и монохромных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов // Наноиндустрия, 2021. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.314.316.



УДК 621.383.52

Фотосенсоры на основе коллоидных квантовых точек для видимого и коротковолнового ИК-диапазона

к. х. н. Попов В. С.^{1,2}, д. ф.-м. н. Пономаренко В. П.^{1,2}, д. т. н. Попов С. В.³¹ АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

povov.vs@tipt.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ АО «Швабе»

129366, г. Москва, просп. Мира, 176

Приведен анализ мирового состояния в области создания фоточувствительных структур и матричных фотоприемников на основе коллоидных квантовых точек на видимый и коротковолновый ИК-диапазоны. Приведено сравнение передовых отечественных и зарубежных результатов в данной области.

Ключевые слова: фотосенсор; коллоидные квантовые точки; КК; ИК.

В последние 5 лет фотосенсорика на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) является одним из наиболее динамично развивающихся направлений фотоэлектроники инфракрасного диапазона, прошедшего за короткое время путь от одноэлементных лабораторных образцов до серийных мегапиксельных матриц. Применение коллоидных квантовых точек существенно упрощает изготовление, снижает ограничения на шаг фоточувствительных элементов матриц и удешевляет технологию производства, что снимает ограничение на широкое применение таких ИК-матриц в технических системах.

Одним из достоинств ККТ является простота управления областью спектральной чувствительности путем изменения их размеров, что, в свою очередь, обеспечивается путем варьирования режимов синтеза ККТ. В последнее время при разработках и изготовлении матричных фотоприемных устройств барьерного типа на основе коллоидных квантовых точек наибольшее распространение получили две архитектуры — с использованием энергетического барьера гетероперехода на контакте слой ККТ PbS/фуллерен C60 или энергетического барьера на контакте двух слоев ККТ PbS донорного и акцепторного типа. В любом из вариантов архитектуры не требуется как таковая стыковка фоточувствительной области с кремниевой СБИС считывания, при этом фоточувствительная структура формируется непосредственно на поверхности СБИС. На основе указанных архитектур созданы и описаны неохлаждаемые матричные фотоприемные устройства с широкой областью спектральной чувствительности от 0,4 до 2,0 мкм и обнаружительной способностью не менее $1,0 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ (20°C , $\lambda = 1,4 \text{ мкм}$), которая при охлаждении сенсора до температуры -20°C увеличивается до значения $4,0 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ форматами 640×512 , 1024×1280 и 1920×1080 при шаге фоточувствительных элементов 15 мкм [2].

Коллективами ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» и МФТИ предложена и исследована усовершенствованная архитектура матричного фоточувствительного элемента на основе ККТ PbS. В качестве верхнего контакта впервые использован

слой нанонитей из серебра, прозрачный для излучения в области длин волн 0,4–2,0 мкм [1].

В целях поиска путей развития направления проведен детальный анализ архитектур, методов получения и основных свойств фотонных сенсоров на основе коллоидных квантовых точек соединений элементов II, IV и VI групп Периодической таблицы Д. И. Менделеева. Описаны особенности синтеза, роль лигандов и морфологии ККТ при создании фотосенсоров. Рассмотрены структурные схемы фоторезистивных, фотодиодных и фототранзисторных элементов на основе коллоидных квантовых точек из HgTe, HgSe, PbS, PbSe, обладающих фоточувствительностью в различных спектральных диапазонах.

В докладе представлено сравнение передовых результатов, полученных в нашей стране и за рубежом.

Литература

1. Попов В.С., Пonomarenko В.Р., Дымкин Д.В., Шуклов И.А., Gadomska А.В., Brichkin S.В., Lavrentiev N.А., Gak V.У., Mirofyanchenko А.Е., Mirofyanchenko E.В., Katsaba А.В., Arsenov P.В., Ivanov V.В., Razumov V. F. // *Doklady Physics*, 2023. Vol. 68. № 7. P. 233.
2. Ponomarenko В.Р., Попов В.С., Шуклов И.А., Ivanov V.В., Razumov V. F. // *Russian Chemical Reviews*, 2024. 93. RCR5113.



УДК 621.383

Отработка в АО «ОКБ «Астрон» технологии корпусирования перспективных крупноформатных матричных микроболометрических приемников ИК-излучения

Бетрозов С. Б., Ерастов Д. А., Иванов С. Ю., Копцев Д. А., Москвичев В. Ю., Попов В. К., Сильницкая О. А., Соколов К. В., Солодков А. А., Худаяров З. Ф., Шилейко Н. А., Юняев Р. Р.

АО «ОКБ «Астрон»

140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1

info@astrohn.ru, saa@astrohn.ru

Представлены результаты отработки технологии корпусирования перспективных крупноформатных матричных микроболометрических приемников ИК-излучения с использованием металлокерамических вакуумплотных корпусов.

Ключевые слова: матричный микроболометрический приемник; инфракрасное излучение; микроэлектромеханические системы; металлокерамический вакуумплотный корпус.

Для корпусирования крупноформатных матричных микроболометрических приемников (ММБП) инфракрасного (ИК) излучения в мировой и отечественной практике наиболее широко применяются металлокерамические вакуумплотные корпуса (МК ВПК). В частности, такие корпуса применяются АО «ОКБ «Астрон» при изготовлении образцов МБ ФПУ 64017 (АДСГ.431156.001).

Для отработки технологии корпусирования перспективных крупноформатных ММБП ИК-излучения были применены доработанные варианты МК ВПК, при этом для контроля качества полученных сборок были использованы типовые для продукции АО «ОКБ «Астрон» кристаллы матричных коммутаторов-мультиплексоров сигналов (МКМС) с изготовленными (с применением МЭМС-технологий) на их поверхностях массивами термочувствительных элементов на основе микроболометров форматом 640×480 элементов.

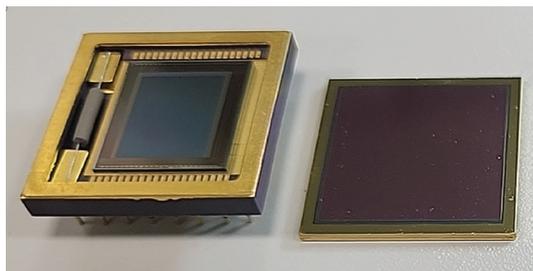


Рис. 1. Фотоизображения составных элементов конструкции ММБП, задействованных при отработке технологии корпусирования

Отработка технологии включала такие операции, как монтаж на основание корпуса таких составных частей, как кристалл и геттер, разварка выводов от контактных площадок кристалла к контактными площадкам корпуса, снятие жертвенного слоя, припаивание вакуумплотного входного оптического окна к основанию корпуса в условиях вакуума с предварительной активацией геттера. Эффективность отработки технологии подтверждена результатами измерений ряда параметров собранных образцов.

Фотоизображения составных элементов конструкции ММБП, примененных при отработке технологии корпусирования, представлены на рис. 1.

УДК 621.383.522

Кремниевые фотодиоды и лавинные фотодиоды для литографических установок на длинах волн 11,2 и 13,5 нм

Забродский В. В., Аруев П. Н., к. х. н., Николаев А. В., Шерстнёв Е. В.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

sildet@mail.ioffe.ru

Представлен обзор результатов в направлении разработки кремниевых фотодиодов для длин волн 11,2 и 13,5 нм, являющихся перспективными кандидатами для использования в установках литографии для проектных норм в единицы нм. Приведены основные характеристики разработанных фотодиодов. Обоснована перспективность применяемого подхода, с точки зрения создания лавинных фотодиодов.

Ключевые слова: кремниевые фотодиоды; лавинные фотодиоды; вакуумный ультрафиолет; рентген.

Развитие конкурентоспособной микроэлектронной промышленности невозможно без литографических машин с современными технологическими нормами [1]. Возможности традиционной литографии с длиной волны 193 нм исчерпаны. Несколько десятков лет в мире идет активное освоение длины волны 13,5 нм, как перспективной платформы для процессов литографии. Уже существуют коммерчески доступные установки, работающие на длине волны 13,5 нм.

Кремниевые фотодиоды являются одним из основных инструментов для регистрации вакуумного ультрафиолета и рентгена. Традиционно, для этого используются фотодиоды под брендами AXUV, SXUV (США, Optodiode).

Разработанные в ФТИ им. Иоффе p+n фотодиоды (SPD) прошли много раз официальную абсолютную калибровку чувствительности на синхротроне.

Метрологические свойства SPD фотодиодов позволяют их использовать для регистрации длин волн 11,2 и 13,5 нм. Архитектура SPD фотодиодов позволяет создавать лавинные фотодиоды для регистрации вакуумного ультрафиолета и рентгена.

Литература

1. Буторин П. С., Калмыков С. Г. Оптимизация условий возбуждения ксенонной лазерной плазмы в источнике экстремального ультрафиолетового излучения для нанолитографии с целью повышения его эффективности // Оптический журнал, 2024. — Т. 91. — № 5. — С. 95–104. — URL: <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-95-104>.

УДК 538.915

Структурные и оптические свойства барьерно-диодных гетероструктур на основе In(As)Sb.**Клековкин А. В.¹, Кривобок В. С.^{1,2}, Пашкеев Д. А.¹, Минаев И. И.¹, Савин К. А.¹, Ерошенко Г. Н.¹, Мартовицкий В. П.¹, Аминов Д. Ф.¹, Николаев С. Н.¹**¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

klekovkinav@lebedev.ru (уточнить)

² АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

Разработана методика роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии барьерно-диодных гетероструктур InAsSb/AlSb и InSb/InAlSb предназначенных для изготовления матричных фотоприемных устройств среднего ИК-диапазона.

Ключевые слова: барьерно-диодная архитектура; молекулярно-лучевая эпитаксия; рентгеновская дифрактометрия; атомно-силовая микроскопия; низкотемпературная фотолюминисценция; микроскопия сопротивления растекания.

Барьерно-диодная (XBn) архитектура широко применяется при создании ИК фотодетекторов на основе In(As)Sb [1], сверхрешеток InAs/GaSb [2] и сверхрешеток InAs/InAsSb [3]. Данная архитектура позволяет устранить объемные токи генерации-рекомбинации Шокли — Рида — Холла, тем самым увеличив рабочую температуру прибора. nBn структура, являющаяся частным случаем XBn архитектуры, состоит из активного слоя n-типа, широкозонного барьерного слоя и контактных областей n-типа. Наличие барьерного слоя позволяет значительно уменьшить рекомбинационный ток через ловушечные центры на гетероинтерфейсе.

В настоящей работе была проведена серия экспериментов по выращиванию XBn структур на основе In(As)Sb методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Использование данных материалов позволит в дальнейшем реализовать матричные фотоприемные устройства для среднего и дальнего ИК-диапазонов. В качестве активной области в данных структурах выступали эпитаксиальные слои InSb или InAs_{1-x}Sb_x толщиной 1–1,5 мкм, в качестве барьерного слоя — In_{0,8}Al_{0,2}Sb и AlSb толщиной до 150 нм соответственно для приведенных поглощающих слоев. Реализация фоточувствительного элемента для диапазона 8–12 мкм, ввиду технологических особенностей осуществлялась с помощью метабuffers слоев.

Качество полученных гетероструктур подтверждено с помощью стандартных методов характеристики кристаллической структуры и электронного спектра. Данные с атомно-силовой микроскопии позволяют утверждать, что средняя шероховатость поверхности слоев не превышала 0,25 нм. Рентгеновская дифрактометрия подтвердила высокое структурное совершенство полученных образцов, однако было замечено, что более высокие температуры роста слоев InAs_{1-x}Sb_x способствовали сегрегации сурьмы и ее дальнейшей десорбции с поверхности, что приводит к обеднению Sb слоя InAs_{1-x}Sb_x. Результаты спектроскопии комбинационного рассеяния света и спектроскопии фотолюминесценции показали малую



дефектность активного слоя, отсутствие глубоких ловушек, а также концентрацию мелких акцепторных центров не более 10^{16} см⁻³. Спектры низкотемпературной фотолюминесценции характеризуются высокой интенсивностью линии рекомбинационного излучения в области края фундаментального поглощения, а анализ формы этой линии указывает на преобладание собственного излучения. С помощью метода микроскопии сопротивления растекания была подтверждена номинально заложенная nВn архитектура, за счет визуализации электронной подсистемы скола образца, продемонстрировано структурное и электронное качество барьерного слоя для разных дизайнов активных областей.

На основе полученных гетероструктур созданы образцы фотоприемных устройств с барьерно-диодной архитектурой фоточувствительных элементов, предназначенных для работы в среднем ИК-диапазоне.

Литература

1. Klipstein P. et al. MWIR InAsSb XBn detectors for high operating temperatures // Infrared Technology and Applications XXXVI // SPIE, 2010. Vol. 7660. P. 939–947.
2. Ting D. Z. Y. et al. Antimonide superlattice complementary barrier infrared detector (CBIRD) // Infrared Physics & Technology, 2011. Vol. 54. № 3. P. 267–272.
3. Kim H. S. et al. Long-wave infrared nBn photodetectors based on InAs/InAsSb type-II superlattices // Applied Physics Letters, 2012. Vol. 101. № 16.

УДК 621.3.049

Печатные фотодетекторы для матричных ФПУ для X-Ray датчиков

Санджиева М. А.^{1,2}, Алешин Д. К.^{1,2}, Даниловский Э. Ю.¹, Куприянова К. И.³,
Каргапольцев С. В.³, Новоселов П. А.³

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А
maria.sandzhieva@itmo.ru

² ООО «ДиАйПи»

188300, г. Гатчина, Пушкинское ш., 20, корп. 1, пом. 2.5

³ ООО «Артек Электроникс»

108841, г. Москва, г. Троицк, ул. Промышленная, 2б, пом. 7б

Разработан матричный фоточувствительный сенсор на основе технологии тонкопленочных органических фотодиодов и транзисторных матриц с InGaZnO-полупроводниковым слоем. Показаны варианты создания датчиков рентгеновского излучения с применением тонкопленочных транзисторных матриц и органических фотодиодов разной площади и разрешения до 500 ppi.

Ключевые слова: OPD; органические фотодетекторы; датчики отпечатка пальца; тонкопленочные фотоприемники; матричные фотоприемники; MOSTFT.

Интеграция органических и перовскитных полупроводников в устройства для детекции оптических сигналов может расширить классическое представление и области применения матричных фотоприемников большой площади.

Тонкопленочные транзисторы (ТПТ) на основе смешанного оксида индия-галлия-цинка IGZO представляют большой интерес для устройств с активной матричной адресацией в качестве считывающей основы для гибридных интегральных микросхем. В работе исследовано влияние различных органических растворителей на эффективность фотодиодного слоя. В результате систематического исследования подбора растворителей был выявлен экологически безопасный растворитель для формирования полупроводниковых чернил, совместимых с ТПТ матрицами. Тонкопленочный слой фотодиодов был нанесен при помощи печатных методов на интегральную микросхему с высокой степенью интеграции управляющих компонентов. В качестве основных методов печати фотодиодного слоя применяли метод лезвийного нанесения (Dr. Blade) и метод центрифугирования.

В ходе работы была разработана экономически эффективная, масштабируемая технология на основе «зеленых» экологически-безопасных растворителей создания фотодетекторов диодного типа (ФДДТ) на основе органических полупроводников как p-i-n, так и n-i-p структуры ФД. Разработан и произведен экспериментальный прототип матричного фотоприемника диодного типа (ФПДТ).

Достигнутые рабочие показатели матричного фотоприемника представлены ниже:

- Технология IGZO TFT подложка, проектная норма 5 мкм;
- Разрешение 400×400;
- Плотность пикселей 500 ppi;
- Размер пикселя 50 мкм;
- Архитектура пикселя IT-IC.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФ (грант №22-79-00137).



УДК 621.3

Инфракрасная радиометрия на основе многорядных инфракрасных фотоприемных устройств для дистанционного зондирования Земли

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, Бурлаков И. Д.^{1,3}, Гектин Ю. М.⁴, Головин С. В.¹, Старцев В. В.¹, Давлетшин Р. В.¹

¹ АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

⁴ АО «Российские космические системы»

111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

Инфракрасные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с борта космических аппаратов находят широкое применение в науке и народном хозяйстве. Для обеспечения дистанционного зондирования Земли в последнее время активно разрабатываются космические средства, предназначенные для решения задач метеорологии, прогноза погоды и климата, изучения природных ресурсов Земли и контроля состояния окружающей среды [1, 2]. В АО «НПО «Орион» на основе ФПУ из КРТ изготовлены многорядные МФПУ, в том числе многоспектральные комплекты МФПУ формата 4x288 (7 диапазонов) для дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы из космоса в обеспечение гидрометеорологической аппаратуры на КА серий «Электро-Л», «Арктика-М» и мониторинга чрезвычайных ситуаций на КА «Канопус-В-ИК».

В основу принципа действия инфракрасных радиометров положено преобразование ИК-излучения от объектов наблюдения в электрические сигналы, на основе которых формируется видимое изображение или задается механизм обработки параметров наблюдаемых объектов при различных фоновых потоках. Для работы в заданных диапазонах ИК области спектра радиометры включают в состав специальные высокочувствительные фотоприемные устройства (ФПУ), использующие матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) с обработкой фотоэлектрических сигналов в БИС считывания. Среди различных полупроводниковых материалов, чувствительных в ИК области спектра, тройные растворы HgCdTe являются лучшим полупроводниковым соединением с точки зрения достижения максимальных фотоэлектрических параметров в заданных ИК-диапазонах спектра, что связано с выбором архитектуры фоточувствительных элементов с уменьшенным влиянием тепловых процессов при детектировании излучения.

Комплект из семи охлаждаемых многорядных ИК ФПУ формата 4x288 элементов на основе КРТ с радиационной системой охлаждения до 80 К обладающий чувствительностью в различных диапазонах инфракрасной области длин волн от 3,5 до 12,5 мкм составляет основу аппаратуры геостационарного многоспектрального

гидрометеорологического комплекса МСУ-ГС, применяемого в космических аппаратах (КА) серии «Электро-Л» и «Арктика-М». Комплекс МСУ-ГС в одном сеансе формирует семь изображений всего диска Земли в ИК-диапазонах с разрешением 4 км.

Комплект из двух охлаждаемых многоядных ИК ФПУ формата 4×288 элементов на основе КРТ на спектральные диапазоны 3-5 мкм и 8-12 мкм, оснащенный работающей по циклу Стирлинга микрокриогенной системой охлаждения, является ключевым компонентом аппаратуры космического комплекса оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций МСУ-ИК-СРМ, входящего в состав исследовательской аппаратуры космического аппарата «Канопус-В-ИК».

Проведен анализ технических решений по улучшению характеристик многоядных ИК ФПУ на основе КРТ для применения в составе космических систем ДЗЗ.

Литература

1. Iakovleva N. I., Boltar K. O., Nikonov A. V. and Egorov A. V., Multi-Row Photodetectors for the Short Wavelength IR Region Based on HgCdTe Heteroepitaxial Structures // Journal of Communications Technology and Electronics, 2018. Vol. 63. № 9. P. 1132.
2. Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Фотоприемные устройства коротковолнового ИК-диапазона спектра, предназначенные для космического мониторинга // Успехи прикладной физики, 2023. — Т. 11. — № 2. — С. 128–138.



УДК 538.911

Мощные квантово-каскадные лазеры для спектрального диапазона 8 мкм

Дюделев В. В.¹, Черотченко Е. Д.¹, Врубель И. И.¹, Михайлов Д. А.¹,
Чистяков Д. В.¹, Мыльников В. Ю.¹, Лосев С. Н.¹, Когновитская Е. А.¹,
Лютетский А. В.¹, Слипченко С. О.¹, Гладышев А. Г.², Подгаецкий К. А.³,
Бабичев А. В.⁴, Папылев Д. С.⁴, Андреев А. Ю.³, Яроцкая И. В.³,
Ладугин М. А.³, Мармалюк А. А.³, Новиков И. И.^{2,4}, Кучинский В. И.¹,
Карачинский Л. Я.^{2,4}, Пихтин Н. А.¹, Егоров А. Ю.², Соколовский Г. С.¹

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
v.dudelev@mail.ru

² ООО «Коннектор Оптикс»
194292, г. Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16, лит. б

³ АО «НИИ «Полюс им. М. Ф. Стельмаха»
117342, г. Москва, ул. Введенского, 3

⁴ Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А
ann3leo@gmail.com

² АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, б/1

Представлено исследование мощных квантово-каскадных лазеров (ККЛ) спектрального диапазона 8 мкм. Наши исследования показали, что ККЛ на основе напряженно-сбалансированных конструкции активной области продемонстрировали высокую эффективность 12% и высокую выходную оптическую мощность 21 Вт.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер; высокая мощность; решеточно-согласованный; напряженно-сбалансированный.

Квантовые каскадные лазеры (ККЛ) используются в медицине, экологическом мониторинге и контроле технологических процессов, а также в других областях науки и техники.

Мы представляем исследование мощных ККЛ для диапазона 8 мкм. Мы исследовали ККЛ с активными областями, согласованными по параметру решетки с подложкой InP (тип 1), и с напряженной активной областью со сбалансированной деформацией (тип 2). Напряженные гетеропары увеличили энергетический барьер между верхним лазерным уровнем и континуумом на 200 мэВ, что снижает скорость выброса электронов из активной области. Образцы ККЛ имели 50 и 40 каскадов для структур типов 1 и 2 соответственно.

ККЛ обоих типов имели длину резонатора 5 мм и ширину полоски 50 мкм. Зеркала лазеров были сформированы сколами без дополнительных покрытий. Исследования проводились в импульсном режиме (100 нс/10 кГц). Пороговые и мощностные характеристики показали, что внутренние потери у ККЛ обоих типов примерно одинаковы и составляют около 2 см^{-1} .

ККЛ типа 2 имели вдвое более высокую характеристическую температуру (T_0 до 256 К) по сравнению с ККЛ типа 1 (143 К), что указывает на снижение

теплого выброса носителей заряда. ККЛ типа 2 показали эффективность 12% и выходную мощность 21 Вт (более 10 Вт на грань), что является рекордным значением для спектральной области 8 мкм. Исследования показали, что перегрев активной области при непрерывной генерации составляет около 100 К.

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 21-72-30020).

Литература

1. Vaks V. L. et al. // Proc. SPIE, 2016. Vol. 9934. P. 99340E.
2. Cousin A. et al. // Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management, Springer International Publishing, 2022. P. 251–277.
3. Kumar C. and Patel N. // Proc. of SPIE, 2012. Vol. 8268. P. 826802.
4. Cherotchenko E. et al. // Nanomaterials, 2022. Vol. 12. P. 3971.
5. Dudevlev V. V. et al. // Physics: Uspekhi, 2024. Vol. 67. P. 92.
6. Babichev A. V. et al. // Technical Physics Letters, 2020. Vol. 46. P. 444.



УДК 621.3.049

Технология изготовления неохлаждаемой микроболометрической ИК-матрицы с шагом элементов 17 мкм

Юркин Н. О.¹, Платонов Д. Д.¹, Ткаченко А. В.¹, Фролова А. О.¹,
Лысенко И. Е.^{1,2}, д. т. н.

¹ ООО «Мэппер»

109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, к. 5
nikita.yurkin@mapperllc.ru

² УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Представлена технология изготовления неохлаждаемой микроболометрической ИК-матрицы с шагом элементов

17 мкм, отработан технологический маршрут формирования элементов конструкции ЕТЭ, включающих анкер, ламели и термочувствительную мембрану.

Ключевые слова: МЭМС; неохлаждаемые микроболометры; единичный термочувствительный элемент; матрица термочувствительных элементов.

Изготавливаемая неохлаждаемая инфракрасная (ИК) микроболометрическая матрица содержит три различных по функциональному назначению единичных термочувствительных элемента (ЕТЭ): активный, слепой и термозакороченный. Каждый отдельно представленный ЕТЭ состоит из трех ключевых элементов конструкции: 1) анкер, обеспечивающий электрический контакт микроэлектромеханической (МЭМС) части с микросхемой считывания и обработки сигнала; 2) ламели, являющейся упругим элементом подвеса ЕТЭ, а также обеспечивающим термическую релаксацию; 3) мембрана, в которой находится термочувствительный слой и слой, поглощающий ИК-излучение.

В работе представлены результаты изготовления неохлаждаемых микроболометрических ИК-матриц с шагом элементов 17 мкм с термочувствительным слоем, выполненным из оксида ванадия (VO_x). Компанией ООО «Мэппер» были разработаны технологические операции формирования анкера для обеспечения неразрывного контакта, формирования ламелей шириной 400 нм и зазором 600 нм на площади кадра 195 мм². Также был отработан технологический маршрут формирования ЕТЭ, поглощающего ИК-излучение с термочувствительным слоем VO_x и 7 нм титаном (Ti) для поглощения ИК-излучения. Были разработаны режимы формирования металлических контактов с заданным значением сопротивления.

УДК 538.958

Двумерные материалы как основа для фотодетекторов**Кунцевич А. Ю.***Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН**119991, г. Москва, Ленинский просп., 53**alexkun@lebedev.ru*

Дается обзор существующих подходов к реализации фотодетекторов на основе существующих двумерных полупроводников и материалов на основе графена. Приводится краткий анализ основных физических и технологических ограничений. Показывается перспектива развития направления.

Ключевые слова: графен; ДХПМ; болометр; матричный фотодетектор; осаждение из газовой фазы.

Недавно появилось довольно много работ, с предложениями и отдельными прототипами одиночных фотодетекторов видимого, ИК и терагерцового диапазона на основе т. н. двумерных материалов [1]. Следует отметить квантовые детекторы на видимый и ближний ИК-диапазон на основе двумерных полупроводников, терагерцовые детекторы и болометры на основе графена, фотодетекторы от видимого до ИК-диапазона на основе графена или дисульфида молибдена, функционализованного квантовыми точками. В подавляющем большинстве это одиночные детекторы, из которых существенная часть изготовлены штучным образом по немасштабируемой технологии из отдельных чешуек двумерного материала, хотя попытки создать матрицы также есть [2].

Следует отметить, что коммерчески выпускаемых детекторов на сегодня пока нет и у этого есть ряд причин:

- большинство двумерных материалов нестабильно на воздухе (кроме графена и дисульфидов переходных металлов);
- планарная технология для двумерных материалов не достаточно разработана, хотя имеются большие успехи в данном направлении;
- поскольку свойства двумерных материалов зависят от количества слоев сильнее всего, получение однородной сплошной пленки с фиксированным количеством слоев представляет собой сложную задачу, а неоднородные пленки позволяют создать только достаточно большие структуры;
- все, что связано с технологией двумерных материалов, пока слишком дорого — технология не промышленная;

Большая часть указанных препятствий преодолена, но требует проведения исследовательских работ. С учетом инвестиций в данную область в Китае и западных странах можно ожидать появления первых приборов на рынке в ближайшие годы.

Литература

1. Qiu Q., Huang Z. Photodetectors of 2D materials from ultraviolet to terahertz waves // *Advanced Materials*, 2021. Vol. 33. № 15. P. 2008126.
2. Dodda A., Jayachandran D. et al. Active pixel sensor matrix based on monolayer MoS₂ phototransistor array // *Nature Materials*, 2022. № 21. P. 1379–1387.



УДК 621.315.049

Материал HgCdTe для матричных фотоприемных устройств ИК-диапазона 8–14 мкм: современное состояние и перспективы развития в РФ

к. т. н. Трофимов А. А.¹, к. т. н. Денисов И. А.², Андрусов Ю. Б.², к. х. н. Гришечкин М. Б.², д. х. н. Моисеев А. Н.³, к. х. н. Чилисов А. В.³, к. х. н. Евстигнеев В. С.³, Коновалов А. А.², к. т. н. Шматов Н. И.², Косякова А. М.¹, Гладышева К. А.¹, Малыгин В. А.¹

¹ АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

aa-troftimov@yandex.ru

² АО «Гиредмет» имени Н. П. Сажина

111524, г. Москва, ул. Электродная, 2, стр. 1

³ Институт химии высококичистых веществ им. Г. Г. Десятых РАН

603137, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49

Для реализации потенциала фоточувствительного материала HgCdTe требуется, помимо прочего, малодефектная поверхность и снижение норм дефектности в объеме материале, что обеспечивается применением изотипных подложек CdZnTe для эпитаксиального роста. В АО «НПО «Орион» изготавливаются подложки CdZnTe с шероховатостью поверхности $Ra = 0,5$ нм и концентрацией ZnTe в диапазоне 3,9–5,1%. Также совместно с АО «Гиредмет» ведутся поисковые работы по прецизионному доведению поверхности HgCdTe, вырашенному методом жидкофазной эпитаксии, в целях получения морфологии и шероховатости поверхности на уровне 1 нм.

Ключевые слова: CdZnTe; полирование; шероховатость поверхности; HgCdTe.

Матричные фотоприемные устройства (МФПУ) на основе HgCdTe являются одними из самых востребованных в мире [1, 2]. Благодаря фундаментальным свойствам HgCdTe обеспечиваются высокая квантовая эффективность, высокая обнаружительная способность и чувствительность при производстве ИК МФПУ, что повышает пространственное разрешение телевизионного канала, тем самым обеспечивая повышение дальности обнаружения и распознавания [2]. Получение высококачественного материала HgCdTe является сложной задачей из-за неоднородности состава и образования различных видов структурных дефектов во время эпитаксиального роста. Дефекты поверхности являются основным источником поверхностной составляющей высокого тока утечки, что в свою очередь повышает уровень шумов фотодиодов. Для полной реализации потенциала HgCdTe необходима высококачественная, бездефектная и, по возможности, атомарно-гладкая поверхность этого материала [3]. На морфологию поверхности эпитаксиальных слоев HgCdTe влияют не только ростовые условия, но также тип подложки и подготовка ее поверхности. В АО «НПО «Орион» в рамках развития технологии и освоения производства подложек CdZnTe (211)В диаметром 50,8 мм, предназначенных для эпитаксиального выращивания HgCdTe методом МЛЭ [4] продолжается работа по улучшению технологии подготовки таких подложек, изготовленных из слитков, вырашенных методом Бриджмена в АО «Гиредмет» [5–7]. При этом шероховатость

поверхности составляет $R_a = 0,5$ нм и концентрация ZnTe в диапазоне 3,9–5,1%, что обеспечивает номинальное совпадение кристаллических решеток CdZnTe и HgCdTe [8] и позволяет выращивать эпитаксиальные слои HgCdTe с параметрами, соответствующими качеству объемных кристаллов [9]. Методом химического осаждения из паров ртути и металлоорганических соединений в ИХВВ РАН на подложках CdZnTe(211)В получены зеркально гладкие слои HgCdTe [10]. В АО «Гиредмет» на подложках CdZnTe (111)В выращивается HgCdTe методом жидкофазной эпитаксии [11, 12], однако во время процесса эпитаксиального роста на поверхности образуются различные виды структурных дефектов, которые являются основным источником поверхностной составляющей высокого тока утечки. В настоящее время ведутся поисковые работы по улучшению технологии подготовки подложек CdZnTe (111)В, а также по прецизионному доведению поверхности HgCdTe в целях получения морфологии и шероховатости поверхности на уровне 1 нм.

Литература

1. Rogalski A. *Infrared Detectors*. USA. CRC Press, 2019.
2. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Кузнецов С. А., Пономаренко В. П. // *Материалы XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и ПНВ* (г. Москва, АО «НПО «Орион»), 2022. — 475 с.
3. Mohd Qasim, Parthiban P., Debangshu Narayan Das Effect of Ultra Soft CMP Processing Parameters on Topography of HgCdTe Wafer Surfaces // *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 8 (11). P. 719–726.
4. Трофимов А. А., Денисов И. А. и др. // *Успехи прикладной физики*, 2022. — Т. 10. — № 3. — С. 289–300.
5. Гришечкин М. Б., Денисов И. А. и др. // *Прикладная физика*, 2014. — № 5. — С. 510–514.
6. Grishechkin M. B., Denisov I. A., Silina A. A., et al. // *Non-Ferrous Metals*, 2016. № 2. 23.
7. Гришечкин М. Б., Денисов И. А., Силина А. А. и др. // *Цветные металлы*, 2016. — № 12.
8. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. // *Электроника: НТБ*, 2020. — № 6. — С. 114–121.
9. Сенченков А. С. // *Успехи прикладной физики*, 2021. — Т. 9. — № 5. — С. 402–409.
10. Чилисов А. В., Моисеев А. Н., Евстигнеев В. С., Костюнин М. В., Трофимов А. А., Денисов И. А. // *Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и ПНВ* (г. Москва, АО «НПО «Орион»), 2024. — С. 345–346.
11. Андрусов Ю. Б., Белов А. Г. и др. // *Цветные металлы*, 2016. — № 12. — С. 56–62.
12. Патент РФ № 2602123 от 30.12.2015.



УДК 621.3.049

Исследование крупноформатного ИК ФПУ на основе цифровых фотомодулей для сканирующей аппаратуры

Бурлаков В. И., Гапонов О. В., Морковников Н. И.

АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

orion@orion-ir.ru

Исследовано применение фотомодулей с цифровыми выходами на фотоэлектрические, теплофизические и массогабаритные параметры крупноформатных ИК ФПУ для сканирующей системы. Приведено сравнение ИК ФПУ на основе фотомодулей с цифровыми и аналоговыми выходами.

Ключевые слова: ИК ФПУ; сканирующая аппаратура; цифровые фотомодули; аналоговые фотомодули.

Необходимость создания перспективного оптико-электронного канала (ОЭК) сканирующего типа для систем обнаружения тепловых объектов (ТО) вызвана расширением зоны интересов для изучения ТО разного типа на поверхности и в атмосфере Земли, обеспечением импортнезависимости, а также невозможностью использования прежних технологий, в том числе в фотоприемной части аппаратуры. Оптико-электронный канал предназначен для обнаружения слабоизлучающих целей, является составной частью широкопольной бортовой аппаратуры обнаружения тепловых объектов (БАО) сканирующего типа.

Ключевым элементом ОЭК является фотоприемное устройство (ФПУ), которое принимает оптический сигнал и проводит его первичную фильтрацию, усиление и аналого-цифровое преобразование для дальнейшей передачи в БАО. В связи с чем ФПУ является устройством, задающим тактико-технические требования ОЭК в целом.

Фотоэлектрические параметры ФПУ являются ключевыми характеристиками при разработке БАО, от них зависит вероятность обнаружения малоразмерных объектов на Земле и в атмосфере Земли. Вольтовая чувствительность является наиболее важным фотоэлектрическим параметром, так как он в конечном счете определяет минимальный поток излучения, который можно обнаружить на фоне собственных шумов фотоприемника.

Для регистрации слабых оптических сигналов в ИК-диапазоне разработаны два типа ФМ, на основе которых строится крупноформатное ИК ФПУ. Первый тип ФМ имеет аналоговые выходные сигналы, а второй тип ФМ имеет цифровые выходные сигналы, формируемые непосредственно в «холодной» зоне ФПУ специализированным мультиплексором.

Первой целью настоящей работы является проведение на основе экспериментальных исследований шумовых и пороговых характеристик ФМ при различных режимах работы сравнительного анализа обоих типов ФМ для выявления особенностей работы при использовании встроенного в мультиплексор сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [1, 2].

Анализ теплофизических параметров ФПУ необходим для подтверждения его работоспособности с системой обеспечения теплового равновесия космического аппарата, так как матрицы фоточувствительных элементов достигают

необходимых фотоэлектрических параметров только при поддержание постоянной температуры ~ 170 К [3].

Литература

1. Бурлаков В. И., Гапонов О. В. Анализ шумовых характеристик для фотомодулей с цифровыми и аналоговыми выходами для регистрации точечных целей // Инновационные технологии, в электронике и приборостроении: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием, 2021. — Т1. — С. 198–202.
2. Бурлаков В. И., Гапонов О. В. Анализ характеристик фотомодуля с цифровыми выходами для регистрации точечных целей // Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство: тезисы докладов X научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. — Москва, 2021. — С. 49–50.
3. Бурлаков В. И., Пешеров В. О., Морковников Н. И. Исследование теплофизических характеристик многоядного крупноформатного фотоприемного устройства с аналоговыми выходами // Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство: тезисы докладов X научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. — Москва, 2021. — С. 37–38.



УДК 535.643.8

Технология формирования матрицы светофильтров на тонкопленочном герметизирующем покрытии OLED структуры

Костышина Л. А.¹, Морозов А. А.¹, Нуриев А. В.^{1,2}, к. т. н., Симаков А. С.¹, Стахарный С. А.¹

¹ АО «ЦНИИ «Циклон»

107076, г. Москва, Шелковское ш., 77

a.nuriev@cyclone-jsc.ru

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Особенности формирования цветного изображения в OLED микродисплеях зависит от ряда технологических особенностей, к которым относятся: качественные характеристики инкапсулирующего покрытия (которое должно удовлетворять требованиям оптической прозрачности и степени герметичности по отношению к парам воды и кислорода), типа используемых цветных фоторезистов и технологии их изготовления. В данном исследовании проводится сравнительный анализ герметизирующих оптически прозрачных пленок, а также экспериментальные данные по разработанному экспресс анализу таких пленок для фотолитографии. Рассмотрены вопросы и особенности при формировании матрицы цветных фоторезистов, используя коммерческие цветные фоторезисты и направления для развития отечественной технологической базы.

Ключевые слова: OLED; Si-OLED; microdisplay; color filters; thin film encapsulation; TFE; органические светодиоды; ОСИД; микродисплеи; цветные фильтры; тонкопленочная герметизация; ТПП.

OLED-микродисплеи активно применяются в качестве средств визуализации в современной портативной электронике; в дополненной реальности (AR) и виртуальной реальности (VR); средствах технического зрения и прочих устройствах. Основными требованиями для этих устройств являются яркость и цветовой охват; напрямую зависящие от качества светофильтров. Одним из основополагающих аспектов технологии данного направления является оптимальные параметры технологического процесса нанесения тонкопленочных герметизирующих покрытий; имеющих высокие оптические показатели пропускания светового потока в видимом диапазоне и изготовления цветных фильтров красного, зеленого и синего фоторезистов на OLED-структуру; что является довольно сложной задачей; так как герметизирующее покрытие должно выдерживать три последовательных процесса фотолитографии; без нарушения герметизирующих свойств; что является не тривиальной задачей для устройств органической электроники.

Стандартная технология совмещения цветных фильтров на стекле с кремниевой пластиной имеет ряд ограничений по размеру субпикселя, с уменьшением размера субпикселя необходимо уменьшать расстояние между активной матрицей и светофильтрами на стекле, чтобы не происходила засветка соседних субпикселей. Таким образом, для повышения разрешения и сохранении диагонали микродисплея

необходимо уменьшать размер субпикселей, что означает уход от классической технологии к новой технологии формирования цветных фильтров поверх герметизирующего покрытия.

Одной из проблем технологии также является многочисленные комбинации многослойных структур, которые первоначально были основаны на технологии диад и триад слоев (технология Vitex) для получения бездефектных герметизирующих оптических пленок. Переборка всех возможных комбинаций занимает огромное количество времени, так как для тестирования свойств оптимальных параметров обычно изготавливается OLED-структура и проходит тестирование на герметизацию. Такой подход очень трудозатратный и материалоемкий, поэтому для проведения экспресс-анализа была разработана собственная методика оценки герметизирующих свойств, чтобы провести сравнительные анализы в короткие сроки и только после определения оптимальных параметров провести тестирование в составе OLED-структуры.

Следующей задачей является отработка технологии изготовления самих цветных фильтров и оптимизация процесса изготовления, так как свойства таких фоторезистов очень специфические и требует тщательной отработки для фоторезиста каждого цвета красного, зеленого и синего, технологические параметры которых отличаются по нанесению, экспонированию и проявлению. В данной работе также рассмотрены технологические аспекты изготовления матрицы цветных фильтров на основе коммерческих материалов.

Литература

1. Chan-mo Kang, Hyunkoo Lee. Recent progress of organic light-emitting diode microdisplays for augmented reality/virtual reality applications // Journal of Information Display, 2022, Vol. 23. № 1. 19–32. URL: <https://doi.org/10.1080/15980316.2021.1917461>.
2. Vitalis C. Anye, Odette F. Ngasoh, Tido T. Stanislas, Apam F. Akudago, Juvet N. Fru, Sharafadeen A. Adeniji. Mechanical Properties of Organic Light Emitting Diodes, Editor(s): M H Ferri Aliabadi, Winston O. Soboyejo, Comprehensive Structural Integrity (Second Edition). Elsevier, 2023. P. 240–261. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822944-6.00053-0>.
3. Нуриев А. В., Стахарный С. А., Усов Н. Н. Гамма-коррекция полноцветных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов // Вестник МГОУ. DOI: 10.18384-2310-7251-2020-3-00-00.



УДК 621.3.049

Результаты разработки передовых БИС считывания с цифровым выходом

Ларионов Н. А., Кузнецов П. А., Якимов Ю. А., Кузнецов А. Н.

АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

В этой работе мы рассмотрим все виды фотоприемных устройств с аналого-цифровым преобразованием на кристалле и их прототипы, которые были разработаны в АО «НПО «Орион» за последние несколько лет. Актуальность этой темы не вызывает сомнений и подтверждается многочисленными публикациями в зарубежных научных журналах, а также ростом производства и применением таких устройств.

Ключевые слова: АЦП; БИС считывания; аналого-цифровое преобразование на кристалле; ячейка считывания.

На данный момент существует три способа реализации аналого-цифрового преобразования на кристалле: в ячейки считывания, в столбце, на выходе. Первые два способа предпочтительнее, так как позволяют существенно уменьшить шумы аналоговых блоков, но сложнее в реализации. Третий способ хоть и не уменьшает внутренние шумы БИС, но исключает их во время передачи сигнала до блока обработки и исключает внешние усилители и АЦП.

В данный момент в АО «НПО «Орион» реализованы матрицы линейного типа с аналого-цифровым преобразованием в ячейке и цифровым ВЗН [1] и в столбце с помощью $\Delta\Sigma$ -АЦП. А также прототип цифровых ячеек считывания для матричных фотоприемных устройств.

Из выявленных недостатков сразу можно отметить, что АЦП в ячейки приводит к росту энергопотребления и требует значительной площади для своего размещения (ячейки с шагом от 45 мкм), что определяет спектр используемых устройств для каждого способа аналого-цифрового преобразования на кристалле.

Аналого-цифровое преобразование в ячейке

На данный момент представлено в виде прототипа, который состоит из 8 ячеек различной архитектуры [2]. Тем не менее, это позволило получить некоторые параметры и убедиться в целесообразности данного способа применения в серийных устройствах.

В результате моделирования и эксперимента было установлено, что при увеличении тока в 16 раз в случае классического автосброса значения цифрового кода вырастает в 12 раз, а в гибридной ячейке увеличение тока в 16 раз увеличивает значение цифрового кода в те же 16 раз, что говорит о высокой линейности.

Разработанные ячейки считывания лучше всего подходят для ФЧЭ, которые генерируют относительно высокие токи — десятки наноампер. Потенциальная область применения — малоформатные матрицы с большим шагом порядка 40 мкм, в которых требуется высокая помехозащищенность.

Аналого-цифровое преобразование в столбце

В этом направлении разработана два вида устройств, оба форматом 1024×10: с АЦП в ячейки и цифровым ВЗН и аналого-цифровым преобразованием в столбце посредством $\Delta\Sigma$ -АЦП [3].

Неоспоримым преимуществом способа с $\Delta\Sigma$ -АЦП является то, что минимальное количество тактов M для достижения 15-битной точности определяется по выражению $n_{bit} = \log_2 M(M+1) - 1$, то есть $M \approx 2^{\frac{n_{bit}+1}{2}}$. Таким образом, количество тактов сокращается до 256. Это позволяет значительно снизить рабочую частоту модулятора и достичь минимальной потребляемой мощности. Также благодаря свойствам мультисэмплинга и перемещения шума в область высоких частот с последующей фильтрацией, снижается влияние широкополосного шума входного тракта и цепей питания примерно в \sqrt{M} раз.

Проведенные разработки и исследования подтверждают актуальность и преимущества внедрения аналого-цифрового преобразования на кристалле. А имеющиеся наработки открывают путь к серийному производству таких устройств.

Литература

1. Ларионов Н. А., Мошев И. С. Реализация цифрового режима ВЗН на кристалле интегральной схемы считывания для сканирующих ФПУ // Прикладная физика, 2018. — № 4, С 111.
2. Кузнецов П. А., Кузнецов А. Н., Якимов Ю. А. Накопительная ячейка с аналого-цифровым преобразованием для матричных ФПУ длинноволнового ИК-диапазона // Успехи прикладной физики, 2022. — Т. 10. — № 6. — С. 577.
3. Якимов Ю. А., Мошев И. С. Малопотребляющий 15-битный дельта-сигма АЦП в столбце для ИК ФПУ // Тезисы докладов IX научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. — М.: АО «НПО «Орион», 2020. — С. 73.



УДК 546.05

Особенности синтеза высокочистого поликристаллического арсенида галлия для оптоэлектроники

Мочалов Л. А., д. т. н., Телегин С. В., к. х. н., Корнев Р. А., д. х. н.,
Слаповская Е. А.

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
mochalov@chem.unn.ru*

Разработана технология синтеза высокочистого поликристаллического арсенида галлия (GaAs) — базового материала лазерной техники. Синтез осуществлен в двухзонном горизонтальном реакторе, при этом, впервые, загрузка исходных высокочистых элементов в реактор проведена методом вакуумной дистилляции. Метод загрузки веществ вакуумной дистилляцией хорошо зарекомендовал себя при синтезе ИК-материалов с рекордно низкими потерями и является единственным способом сохранения чистоты исходных веществ при загрузке их в реактор для синтеза.

Ключевые слова: арсенид галлия; оптоэлектронные материалы и компоненты. технологии глубокой очистки.

Актуальность работы определяется тем, что в настоящее время в РФ не производится высокочистый поликристаллический арсенид галлия (GaAs), необходимый для выращивания монокристаллического GaAs — базового материала лазерной техники. В настоящее время потребность в высокочистом арсениде галлия, полученного методом Бриджмена для оптоэлектронных применений составляет до 500 кг/год (по данным Минпромторга РФ). Научная новизна заключается в использовании собственных технологичных решений для повышения чистоты исходных коммерчески доступных элементов (As и Ga) до чистоты от 7N и лучше, а также, впервые загрузка исходных высокочистых элементов в реактор осуществляется в вакууме для обеспечения чистоты конечного продукта на уровне не хуже чистоты исходных веществ.

Поликристаллический GaAs обычно получают посредством реагирования паров As с металлическим Ga при высокой температуре в запаянных кварцевых ампулах. Как правило, емкость с As, помещенную у одного конца ампулы, нагревают до температуры 618 °С. В результате в ампуле образуется давление паров As в 1 атмосфере, что необходимо для получения стехиометрического GaAs. Пары As взаимодействуют с металлическим Ga, который поддерживается при температуре 1238 °С и находится у другого конца ампулы в лодочке из кварца или пиролитического нитрида бора (PBN). После того, как As полностью прореагирует, образуется поликристаллический GaAs.

Основным недостатком традиционного метода является загрузка исходных элементов — As и Ga на воздухе, что существенно снижает чистоту конечного продукта.

В данной работе синтез высокочистого поликристаллического GaAs впервые проведен в двухзонном горизонтальном реакторе, при этом, впервые, загрузка исходных высокочистых элементов в реактор проводится методом вакуумной дистилляции. Метод загрузки веществ вакуумной дистилляцией хорошо зарекомендовал

себя при синтезе ИК-материалов с рекордно низкими потерями и является единственным способом сохранения чистоты исходных веществ при загрузке их в реактор для синтеза. Для синтеза арсенида галлия такой метод ранее не использовался.

Литература

1. Mochalov L., Logunov A., Vorotyntsev V. Preparation of gallium of the special purity for semiconductors and optoelectronics // Separation and Purification Technology, 2021. 258, 118001. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.118001.
2. Патент № 218.016.2604 РФ, Способ вакуумной очистки теллура от углеродсодержащих наноразмерных гетеровключений / Нежданов А. В., Машин А. И., Мочалов Л. А. — Оpubл.13.02.2018.
3. Патент РФ № 2585479 «Плазмохимический способ получения халькогенидных стекол системы as-s и устройство для его реализации».



УДК 621.3

Обоснование возможности создания оптико-электронных систем технического зрения робототехнических комплексов воздушного, наземного и подводного назначения для применения в условиях естественных и организованных оптических помех.

Грузевич Ю. К., Гордиенко Ю. Н., Альков П. С., Чистов О. В.

¹ ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»

107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, 23, стр. 2

² МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

В статье рассматриваются возможности применения лазерных оптико-электронных, активно-импульсных каналов в системах технического зрения воздушных, наземных и подводных робототехнических комплексов в условиях естественных и организованных оптических помех.

Ключевые слова: активно-импульсная система, система технического зрения, естественные и организованные оптические помехи, роботиз.

План статьи:

1. Введение (актуальность применения защищенных стз в ртк)
2. Существующие методы формирования видеоизображений
3. Активно-импульсный метод
4. Система технического зрения АИС ЗАСЛОН для РКТ воздушного применения
5. Результаты работы (Торжок выезды)
6. Возможности цифровой обработки и получения псевдообъемных изображений.
7. Заключение.

Постановка настоящей работы вызвана необходимостью обеспечения наблюдения, обнаружения и распознавания объектов не только при благоприятных условиях внешней среды, но и при наличии в поле зрения различных факторов, мешающих работе традиционных систем технического зрения.

Таковыми факторами являются низкая освещенность, туман, дым, присутствие костров, огня, постановщиков преднамеренных оптических помех, ярких источников света и т. п.

В последнее десятилетие на стыке областей прикладной оптики и средств вычислительной техники интенсивно развиваются системы технического зрения (СТЗ). СТЗ являются разновидностью оптико-электронных приборов, включающих приемную оптическую систему, приемник оптического излучения, вычислительное устройство и специализированное программное обеспечение. Основные задачи, решаемые такими аппаратно-программными модулями — управление движением, обнаружения и распознавания типовых малоразмерных низкоконтрастных целей на земле, в воздухе и под водой в условиях ограниченной видимости, обусловленной естественными и организованными оптическими помехами различного типа.

Применение СТЗ минимизирует роль оператора в процессе принятия решения о значении измеряемой физической величины, что объективно улучшает показатели точности, достоверности и производительности.

В настоящее время, ввиду высоких темпов развития и росту требований к разрабатываемой продукции в военно-промышленном комплексе, как в России так в зарубежных странах, одной из главных задач, стоит создание современной системы технического зрения, которая позволит формировать изображения в условиях наличия любого рода оптических помех.

На основании анализа опубликованных исследований и статей в данной отрасли, были рассмотрены этапы развития в области создания оптико-телевизионных приборов и теоретические исследования, проводимые в области улучшения их характеристик.

Технология разработки технического зрения объединяет возможности оптико-телевизионных приборов, датчиков, компьютеров и программных алгоритмов. Объективный обзор существующих методов приведен в работах [7, 16, 29, 33, 44, 45, 54, 56]. На основании анализа данных работ, возможно классифицировать изученные направления по следующим разделам:

1. Существующие методы формирования изображений. В настоящий момент к таким относятся:

1.1. Тепловизионный метод. В основу теории моделирования тепловизионных изображений заложен процесс формирования видеосигналов, пропорционально потоку теплового излучения объекта для всего тепловизионного кадра, в котором содержится L строк и N элементов в строке.

1.2. Метод многократного усиления существующего света. В основе данного метода лежит использование отраженного от объекта наблюдения света который, проходя через объектив создает изображение на входе (катоде) ЭОП, которое электронным способом усиливается и, проецируется на выходном экране преобразователя.

1.3. Метод дистанционного лазерного сканирования. Данный метод построен на применении технологии измерения расстояний путем излучения светового импульса и замера времени возвращения этого отраженного света на приемник.

1.4. Активно-импульсный метод. На практике он заключается в освещенности наблюдаемого пространства импульсами оптического излучения с длительностью меньшей, чем время распространения импульсов до объектов наблюдения, и в синхронизированном приеме отраженных от данных объектов оптических сигналов. Такой метод обеспечивает наблюдение ограниченного по глубине окружающего пространства и резко уменьшает зависимость наблюдения от условий освещенности объектов наблюдения и окружающих их фонов.

В настоящее время для обнаружения, наблюдения и измерения параметров объектов в различных условиях окружающей среды применяются активно-импульсные телевизионные системы (АИТС). Системы могут применяться как в нормальных, так и в сложных условиях наблюдения за объектами: в солнечный день, в сумерки и ночью, при ограниченной или низкой прозрачности среды распространения излучения, при наличии дымки, тумана, различных осадков, естественных и искусственных световых помех [7].

Дальность действия и вероятность распознавания объектов традиционными телевизионными системами наблюдения значительно ограничивается в условиях



пониженной прозрачности среды распространения. Основной причиной ограничения дальности обнаружения и идентификации объектов интереса в сложных условиях видимости является воздействие помехи обратного рассеивания.

Помеха обратного рассеивания возникает из-за рассеяния фотонов света в толще аэрозолей, находящихся в атмосфере в направлении наблюдателя, что приводит к значительному понижению контраста изображения и как следствие к невозможности обнаружения и распознавания объектов.

Отличительными особенностями АИ ТС являются устранение помехи обратного рассеивания и значительное ослабление световых помех естественной и искусственной природы. Импульсный режим работы системы позволяет сформировать активную зону видения и исключить все, что находится за ее пределами.

В результате проведенных исследований и экспериментов АИ ТС состоящая из ЭОП, ТВ и лазера, позволит обеспечить следующие параметры работы:

- 1) высокую помехоустойчивость в импульсном режиме работы;
- 2) работу при пониженной прозрачности среды распространения, обеспечивающую видимость малоконтрастных объектов;
- 3) возможность измерения дальности до объекта наблюдения, исключающее ложное измерение, так как все предметы, которые могут вызвать ложный сигнал (ветви деревьев, кустов и пр.), отсекаются задержкой стробирования;
- 4) обнаружение объектов наблюдения по бликам — отражениям от оптических и оптоэлектронных средств этих объектов при их подсветке лучом лазерного осветителя;
- 5) обнаружение замаскированных объектов благодаря работе в ИК-области спектра.

Учитывая необходимость выполнения согласования и управления основными элементами входящими в состав системы АИ ТС, оптимальным техническим решением, будет расположение элементов, как представлено на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная схема АИ ТС [14]

Все вышеуказанные компоненты системы должны быть обеспечены современными электронными блоками питания и управления, а также обладать возможностью цифровой обработки информации в реальном масштабе времени.

Представленные на современном рынке АИ ТС не оснащены компонентами последних поколений, а именно высокочувствительные быстродействующие ЭОП III поколения и камеры на основе быстродействующих мегапиксельных КМОП-матриц, значительно превосходящих матрицы ПЗС.

В связи с этим, в настоящем обзоре необходимо остановиться на преимуществах современных компонентов АИ ТС, которые должны обеспечить выполнение задач настоящей работы.

Рассмотрим проведенные исследования о применении ЭОП в составе АИ ТС.

Для оптико-телевизионных систем (рис. 2), важной задачей является обзор наземного и воздушного пространства, обнаружение, распознавание объектов, захват и автосопровождение подвижных объектов, выявление препятствий по курсу полета (на мониторе), измерение наклонной дальности до объектов, функционирование в простых и сложных метеоусловиях, обеспечение безопасного пилотирования, взлета и посадки (в том числе на неподготовленные площадки), а также выполнение специальных задач (разведка, поиск, десантирование обеспечение круглосуточного обзора и контроля пространства передней полусферы по направлению полета, обнаружение и предупреждение столкновения с возможными препятствиями (например, проводами и опорами линий электропередач, дымовыми трубами, мачтами и другими высокими объектами при полетах на малой высоте в условиях низкой освещенности или недостаточной видимости (дождь, туман, задымленность и сильная запыленность)).



Рис. 1. 16 — Бортовые оптико-электронные системы вертолетов

Таким образом, ОТС должна обеспечивать:

- 1) безопасность при маловысотном полете, в том числе в условиях сложной природно-климатической внешней обстановки;
- 2) возможность эксплуатации вертолетов круглосуточно и всепогодно;
- 3) возможность взлета и посадки на неподготовленные площадки;
- 4) возможность обнаружения в сложных метеоусловиях малозаметных объектов по направлению полета (провода ЛЭП, мачты, вышки и другие высотные объекты).

Как правило, системы обнаружения препятствий, представленные на современном рынке бортовой авионики, имеют в своем составе следующие



модули: — сканирования; — управления; — сигнализации. В состав разрабатываемого изделия входит: 1) модуль сканирования — АИС: активно-импульсная оптикотелевизионная система для обнаружения проводов ЛЭП, имеющая в своем составе лазерный передающий канал и стробируемый приемный канал; 2) модуль управления и сигнализации — УОВ: аппаратура управления, обработки и визуализации информации АИС, имеющая в своем составе модуль процессорной обработки типа ELV-MC03-SMARC и модуль управления и визуализации — ЭПП типа защищенного планшета MIG T9 или МФИ12-0436.

Структурная схема минимальной комплектации изделия в составе БРЛС-ВА с использованием индикатора МФИ12-0436 для обработки и отображения информации от АИС представлена на рис. 1. В таком варианте использования данные АИС, включая видео и параметрическую информацию, поступают в МФИ12-0436. Узел вычислительный МФИ12-0436, в соответствии с навигационными параметрами, получаемыми от комплекса бортового оборудования, и алгоритмами СОП производит управление АИС

Дополнительно, отображение информации от АИС, подготовку предполетных данных и считывание/обработку регистрации возможно осуществлять при добавлении ЭПП (см. рис. 2). Информация от АИС в таком случае может дублироваться на ЭПП, а личному составу будет предоставлена возможность использовать его для отображения информации от АИС, в то время как МФИ занят отображением другой полетной информации на других кадрах

При работе активно-импульсной системы объект подсвечивается короткими лазерными импульсами, длительность которых значительно меньше времени распространения света до объекта и обратно. Регистрация рассеянного (отраженного) излучения осуществляется приемным оптическим каналом на базе ЭОП 2+ или 3 поколения, оптически сопряженного с ПЗС или КМОП матрицей. При этом затвор ЭОП открывается в такт с посылкой лазерных импульсов на определенное время и, таким образом, осуществляется прием излучения, отраженного именно от объекта, а не от частиц пыли, тумана, дождя, снега, в слое пространства между системой и объектом. В том случае, когда временная задержка между моментом излучения импульса и моментом открывания затвора равна времени, необходимому для прохождения светом расстояния до объекта и обратно, наблюдатель будет видеть только сам объект и участок пространства, непосредственно его окружающий (в зависимости от длительности лазерного импульса подсветки и открытия затвора ЭОП). Схема работы активно-импульсной системы приведена на рис. 30–31.

УДК 681.785.5

Создание аппаратуры регистрации изображений с дополненной реальностью в виде спектральных эффектов, полученных принципиально новым способом в кадровом формате**Агринский М. В.¹, Откупман Д. Г.², Старцев В. В.³**¹ *АО «ОКБ «Астрон»**140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1**magr932@yandex.ru*² *Московский государственный университет геодезии и картографии**105064, г. Москва, Гороховский пер., 4**odvk@ya.ru*³ *АО «НПО «Орион»**111538, г. Москва, ул. Косинская, 9**orion@orion-ir.ru*

Исследования и проектные работы преследуют достижение цели — разработка и создание нового оптимального схемного решения аппаратуры для регистрации гиперспектральных эффектов как дополненной реальности в кадровом формате.

Ключевые слова: спектральные эффекты; анаморфотное сжатие; дополненная реальность.

Спектральные детализирующие характеристики, часто четко невидимые и не регистрируемые RGB фото/видео камерами, каждого объекта различны и непосредственно связаны со свойствами составляющих веществ и тем самым несут информацию о составе объекта, его структуре, состоянии и т. п.

В настоящее время промышленно реализованы два метода гиперспектральной съемки — сканирующий шелевой с обычной КМОП ПЗС матрицей и кадровый с бельгийской ПЗС матрицей IMES [1]. Основное преимущество кадровых систем — наблюдение объекта происходит в привычном 2D формате без дополнительной программной обработки и без относительных динамических перемещений камеры и объекта.

В рамках проекта будет разработан новый тип оптической системы объектива, специально оптимизированный для получения изображений со спектральными составляющими. Примером реализации нового подхода может служить концептуально новое решение в виде сжатия путем анаморфотного преобразования (оптического анаморфирования) наблюдаемого поля зрения (рис. 1а) по оси абсцисс и ординат — искусственное преобразование в шелевое изображение всего поля зрения (рис. 1б). Далее выделение интересующей спектральной составляющей (гиперспектральная развертка) для последующего восстановления координат и формы исследуемого объекта. Таким образом, из вертикальной и горизонтальных спектральных разверток программным способом восстанавливается квази изображение исследуемого объекта в виде дополненной реальности с последующим нанесением его на снятое в RGB поле зрения (рис. 1в).

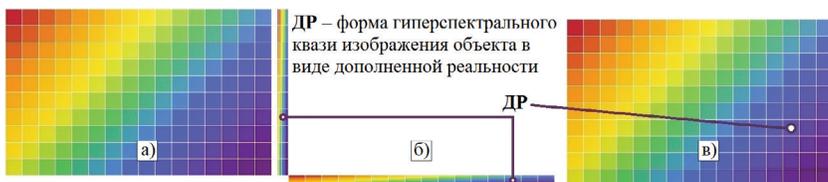


Рис. 1. Новый подход для исследования спектральных составляющих

Изображения будут получаться в кадровом формате в реальном времени, что позволит использовать их для решения задач, требующих мгновенной реакции. Информация о спектральной составляющей объекта наносится на обычное RGB-изображение в виде дополненной реальности, что позволяет быстро и точно локализовать интересные объекты в пространстве. Например, при промышленной диагностике утечка газа из одного из кранов будет представляться в виде, проиллюстрированном на рис. 2. На RGB-изображение, как дополненная реальность, накладывается зона утечки метана, сформированная указанным спектральным способом с использованием полос поглощения метана, причем, эта зона может окрашиваться в любой цвет (на рисунке — в красный).



Рис. 2. Иллюстрация обнаружения утечки газа

Литература

1. Imec R&D, nano electronics and digital technologies. URL: <http://imec-int.com/> (дата обращения: 07.03.2024).

УДК 621.383:621.315.5

Матричные SWIR фотоприемники на основе меза-планарных InGaAs ХВп-гетероструктур

Иродов Н. А.¹, д. ф.-м. н. Болтарь К. О.^{1,2}, к. т. н. Седнев М. В.¹, Трухачев А. В.¹, к. т. н. Лопухин А. А.¹

¹ АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
orion@orion-ir.ru, www.orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Представлены результаты исследований фотоэлектрических параметров элементов в МФЧЭ на основе гетероэпитаксиальных ХВп-структур с поглощающим слоем InGaAs диапазона 1–1,7 мкм. Показана перспективность использования меза-планарной технологии для изготовления высокоэффективных матриц фотодиодов, позволяющей успешно сочетать малый темновой ток и ампер-ваттную чувствительность.

Ключевые слова: МФЧЭ; МФПУ; ХВп-структура; темновой ток.

В МФПУ традиционно используются МФЧЭ, изготовленные по планарной технологии, освещаемые со стороны подложки. В планарной технологии *p-i-n*-фотодиодов, изготовленных на основе $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ на сильнолегированной подложке InP, использовались гетеропереходы *n*-InGaAs/*i*-InP. Для фотодиодов, изготавливаемых по меза-технологии, использовались гетеропереходы *n*-InGaAs/*p*-InP/*p*⁺⁺-InGaAs. МФЧЭ на основе меза-технологии привлекательны малой фотоэлектрической взаимосвязью между соседними пикселями, так как объемы, которые генерируют фототок при освещении, разделены [1].

Перспективным развитием применения ХВп-структур для разработки технологии фотодиодов с фото-активным слоем $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ является использование в качестве широкозонного материала слоев $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$ с согласованным периодом решетки. Нелегированный AlInAs, одновременно являясь барьерным и пассивирующим слоем, позволяет изолировать фотодиоды друг от друга не открывая поверхность поглощающего слоя InGaAs, и также уменьшая ток диффузии электронов.

Значения темнового тока элементов МФЧЭ, изготовленных по меза-планарной технологии на ХВп-структурах при напряжении смещения –0,1 В, составляют 0,1–0,8 пА для различных структур [2].

Изменение параметров функциональных слоев исходных гетероэпитаксиальных ХВп-структур эффективно влияют на темновые токи и ампер-ваттную чувствительность элементов матриц. На основе проведенных исследований оптимизированы параметры функциональных слоев ХВп-структур:

- концентрация носителей тока в поглощающем слое $\sim 1,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- толщина области переменного состава $\sim 55 \text{ нм}$;
- поверхностная плотность заряда в градиентных областях $\sim 3,6 \dots 4,6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Изготовлены высокоэффективные МФЧЭ на ХВп структурах формата 320×256 с шагом 30 мкм и 640×512 с шагом 15 мкм с оптимальными параметрами функциональных слоев и исследованы их фотоэлектрические параметры. Темновой ток



равен 0,15 пА при напряжении смещения $-0,1$ В. Среднее значение темнового тока, измеренное в составе МФП, составляет ~ 3 фА (при $U_{\text{смещ}} = -0,46$ В). Удельная обнаружительная способность D^* в МФПУ превысила 10^{13} Вт $^{-1}$ см $^{-1}$ Гц $^{1/2}$, дефектность менее 0,5%.

Литература

1. Седнев М. В., Болтарь К. О., Иродов Н. А., Демидов С. С. Исследование фотоэлектрической взаимосвязи элементов матричных ФП на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs // Прикладная физика, 2015. — № 3. — С. 73.
2. Седнев М. В., Болтарь К. О., Иродов Н. А., Демидов С. С. Вольт-амперные характеристики nВр-структур с поглощающим слоем In $_{0,53}$ Ga $_{0,47}$ As // Успехи прикладной физики, 2017. — Т. 5. — № 4. — С. 341–349.

УДК 621.3.049.779

Разработка системы кремниевых волноводов как элемента стандартной библиотеки проектирования**Шишкин А. В.¹, Габуллин А. Р.¹, Желтиков В. А.¹, Тюлькова А. А.¹, Орликовский Н. А.¹, Архипов С. В.¹, Сороковых Д. Е.¹, Аббасов Т.¹, Лихачев Б. В.², Гаврилов К. А.², Денисов А. А.¹**¹ АНООВО «Сколковский институт науки и технологий»*Центр исследовательской инфраструктуры**121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,**Большой бульвар, 30, стр. 1**a.shishkin@skoltech.ru*² ООО «Дифра Лаб»*614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15*

В рамках создания стандартизированной библиотеки компонентов проведения моделирование распределения электромагнитного излучения в сечении волноводов разного типа, определены границы одномодового режима и минимальные радиусы скругления, разработаны режимы реактивного ионного травления, а также проанализировано влияние параметров процессов плазмохимического травления на шероховатость кремниевых структур.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; кремний на изоляторе; волноводы; интерферометрические делители; реактивное ионное травление; шероховатость боковых стенок.

Необходимость в устройствах СВЧ диапазона для генерации, передачи, обработки или приема сигналов растет с каждым годом. Быстродействие кремниевых электронных компонентов близко к своему технологическому пределу, поэтому в последние десятилетия особый интерес проявляется к устройствам, использующим излучение разных диапазонов длин волн (в особенности 1300 и 1550 нм), таким как фотонные интегральные схемы (ФИС). Изготовление ФИС возможно на различных технологических платформах, таких как «кремний на изоляторе» (КНИ), нитрид кремния и др. Работа с КНИ платформой позволяет использовать весь опыт, полученный за десятилетия становления микроэлектронной промышленности [1], кроме того КНИ платформа предлагает почти полный набор фотонных компонентов, включая модуляторы, фильтры, разветвители, мультиплексоры, резонаторы, устройства контроля поляризации, фотодетекторы и др. [2]

Задачи, которые ставятся перед интегральными фотонными устройствами, зависят от конкретного пользователя и могут существенно различаться. Поэтому для производителей и потребителей ФИС важно наличие стандартной отработанной базы активных и пассивных элементов, из которой возможно сформировать законченное устройство с заданными параметрами (т.н. process design kit или PDK). Ключевым пассивным элементом являются оптические волноводы, также включающие в себя конвертеры модового поля и волноводы различного сечения, качество которых напрямую характеризуют изготовленную ФИС. Шероховатость боковых стенок (line edge roughness или LER) является одним из наиболее значимых факторов состояния структур в силу их малых размеров [3]. Проблема снижения



шероховатости решается как за счет снижения шероховатости маски, так и за счет отработки технологических процессов.

В работе описан эксперимент, в котором разработана модель на основе расчета распространения электромагнитного излучения в волноводах с различным сечением, изготовлены образцы и проведен анализ оптических характеристик. В ходе моделирования были определены границы одномодового режима и минимальные радиусы скругления, а также оптимальная форма конвертеров модового поля. Изготовление пассивных элементов ФИС на КНИ платформе производилось при помощи реактивного ионного травления, которое позволяет обеспечить требуемый профиль структур и низкую шероховатость боковых стенок. Разработаны технологические операции формирования фотолитографической маски и реактивного ионного травления. Представлен анализ влияния параметров процесса плазмохимического травления на шероховатость волноводных структур и их функциональные оптические характеристики.

Литература

1. Siew S.Y. et al. Review of silicon photonics technology and platform development // Journal of Lightwave Technology, 2021. Vol. 39. № 13. P. 4374–4389.
2. Bowers J. E. et al. Recent advances in silicon photonic integrated circuits // Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems V, 2016. Vol. 9774. P. 977402.
3. Fouchier M., Pargon E. HBr/O₂ plasma treatment followed by a bake for photoresist linewidth roughness smoothing // Journal of Applied Physics, 2014. Vol. 115. № 7.

УДК 621.3.049.779

Разработка кремниевого интегрального интерферометрического делителя как элемента стандартной библиотеки проектирования

**Желтиков В. А.¹, Сороковых Д. Е.¹, Орликовский Н. А.¹, Габидуллин А. Р.¹,
Архипов С. В.¹, Аббасов Т.¹, Шишкин А. В.¹, Тюлькова А. А.¹, Лихачев Б. В.²,
Гаврилов К. А.², Денисов А. А.¹**

¹ АНООВО «Сколковский институт науки и технологий»

Центр исследовательской инфраструктуры

121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,

Большой бульвар, 30, стр. 1

v.zheltikov@skoltech.ru

² ООО «Дифра Лаб»

614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

В рамках создания стандартизированной библиотеки компонентов разработан кремниевый пассивный интерферометрический делитель для С-диапазона длин волн. Проведено моделирование параметров элемента, разработана технология его производства и выполнены измерения оптических характеристик.

Ключевые слова: кремниевая фотонная интегральная схема; стандартизированная библиотека компонентов; интерферометрический делитель; лазерная литография.

Фотоника на сегодняшний день является чрезвычайно активно развивающейся отраслью с оборотом более \$8 млрд в год. Фотоника переживает сегодня примерно такой же этап, как и микроэлектроника десятки лет назад, когда степень интеграции стремительно увеличивается, а функционал устройств на основе ФИС расширяется. Интегральная фотоника постепенно замещает в некоторых устройствах элементы микроэлектроники. Современные технологии сталкиваются с постоянно растущими требованиями к конечным устройствам, а именно:

- ужесточающиеся требования по энергопотреблению;
- размеры и вес устройств уменьшаются, а требования к производительности растут;
- растут требования по устойчивости устройств к внешним воздействиям.

Это приводит к тому, что интегральная фотоника становится чуть ли не безальтернативным вариантом.

Ключевые мировые производители используют процесс Multiple Project Wafer (MPW), который позволяет сделать дешевле процесс изготовления интегральной схемы путем размещения нескольких чипов с различной архитектурой под разные проекты на одной пластине.

Однако, для реализации процесса MPW необходимо иметь стандартизированную библиотеку компонентов, которые имеют гарантированный уровень линейных потерь, эффективности ввода-вывода и тд. В таком случае проектирование фотонных интегральных схем будет сводиться к компоновке схемы с использованием стандартных элементов с известными характеристиками. Такое решение



используется мировыми лидерами в области интегральной фотоники и упрощает как проектирование интегральной схемы, так и ее изготовление.

Одним из ключевых элементов пассивной фотонной интегральной схемы является интерферометрический делитель, который позволяет разделить мощность вводимого излучения на два канала, либо наоборот, объединить два канала в один. Это необходимо для создания широкого спектра как управляемых, так и пассивных фотонных устройств, таких как интерферометр Маха—Цендера, фазовый, термо- и электрооптический модуляторы и др. [1].

В ходе эксперимента разработана модель на основе расчета распространения электромагнитного излучения с учетом геометрии интерферометрического делителя. В результате моделирования определены оптимальные значения ширины и длины бокса делителя, а также оптимальная форма тейперов и их положения.

Изготовление элементов фотонных интегральных схем проводилось методом оптической лазерной многолучевой литографии, который позволяет значительно ускорить процесс создания резистивной маски по сравнению с электронной литографией, получив при этом элементы интегральной схемы с заданными характеристиками. Помимо этого, изготовление устройств методом лазерной литографии имеет потенциал в части масштабируемости и переноса технологического процесса на крупносерийное производство с минимальными изменениями техпроцесса, и, следовательно, его легкой адаптацией.

Измерение изготовленных интерферометрических делителей производилось на автоматизированной зондовой станции методами измерения вносимых потерь и рефлектометрии [2].

Литература

1. Петров В. М., Шамрай А. В. СВЧ интегрально-оптические модуляторы. Теория и практика, 2021.
2. Цаплин А. И., Лихачев М. Е. Методы измерений в волоконной оптике. — Пермь: изд-во ПНИПУ, 2011.

УДК: 621.386.832

Датчик изображений по технологии КМОП BSI для медицинских приложений

Супонников Д. А., Спицын В. Ю., к. т. н.
АО «Медицинские технологии Лтд (МТЛ)»
105318, г. Москва, ул. Мироновская, 25
sda@mtl.ru, svyu@mtl.ru

Разработан КМОП-датчик по технологии BSI, обладающий высокой гибкостью управления, встроенной температурной компенсацией, внутрипиксельным объединением заряда и различными режимами затвора. Датчик предназначен для широкого спектра применения, в том числе и для задач медицинской диагностики в области дентальной терапии, хирургии и ортопедии.

Ключевые слова: C90; CIS; BSI; CDS; HDR; X-Ray; Sequencer; биннинг; пиксель; матрица.

В настоящее время локальный рынок датчиков изображения в основном зависит от импортной продукции, что ограничивает возможности выбора датчика и среды окружения (драйверы ОС, прикладное ПО) для отечественных производителей и системных интеграторов. Для решения данной проблемы. разработан новый КМОП-датчик изображения, адаптированный для производства в условиях ограниченных возможностей кооперации с большинством фабрик, располагающих необходимыми опциями техпроцесса. Новый подход предлагает простую и готовую к повторному использованию конструкцию, легко адаптируемую к различным технологиям производства ИС, обеспечивая универсальное решение для широкого спектра применений.

В основе разработки лежит технология КМОП с обратной засветкой (BSI), которая значительно повышает светочувствительность и снижает шум по сравнению с традиционными датчиками с прямой засветкой (FSI). Технология BSI эффективнее для работы при слабом освещении и позволяет достичь лучшего качества изображения, что является критически важным фактором во многих приложениях обработки изображений.

Особенностью датчика является иерархическая модульная архитектура с разделением аналоговых и цифровых блоков. Данная методология проектирования облегчает настройку и обновление, позволяя разработчикам адаптировать датчик к конкретным требованиям без переработки всего чипа.

Новый датчик изображения включает в себя несколько инновационных функций, которые отличают его от импортируемых датчиков.

1. *Расширенные возможности управления устройством.* Разработана программируемая система управления, позволяющая точно настраивать параметры датчика. Данная функция позволяет оптимизировать работу для различных сценариев съемки и легко интегрироваться в разнообразные системы камер.
2. *Схемы температурной компенсации на чипе.* Реализованы передовые механизмы измерения температуры и непосредственной компенсации на чипе. Функция обеспечивает стабильное качество изображения в широком



диапазоне рабочих температур, что критически важно для наружных и промышленных применений.

3. *Внутрипиксельное объединение заряда.* Функция значительно улучшает работу при слабом освещении, объединяя заряд соседних пикселей, улучшая соотношение сигнал/шум в тракте считывания и аналого-цифрового преобразования, исключая необходимость сложной постобработки.
4. *Режимы затвора.* Микросхема поддерживает несколько режимов затвора, включая бегущий и глобальный затвор. Функция позволяет адаптироваться к различным типам сцен и требованиям съемки, делая датчик пригодным как для фотосъемки, так и для видеоприложений. Имплементированная на кристалле схема автоматического детектирования экспозиции закрывает запрос требований автономного срабатывания датчика при возникновении облученности, что важно для сценариев применения в медицинском рентгене.

Сочетание перечисленных функций позволяет создать высокопроизводительный датчик изображения, который может превосходить по характеристикам многие импортные аналоги. Полная локализация разработки позволяет тесно сотрудничать с отечественными производителями камер и устройств, обеспечивая итерационные улучшения и настройки в соответствии с конкретными потребностями рынка.

Модульная архитектура позволяет внедрять в будущем новые технологии, такие как усовершенствованные алгоритмы шумоподавления, без необходимости полного перепроектирования.

Литература

1. Paul Vu, Boyd Fowler, Chiao Liu, Janusz Balicki, Steve Mims, Hung Do. Design of Prototype Scientific CMOS Image Sensors // SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 23–28 June 2008, Marseille, France Paper #7021-2 to be published in Proceedings of SPIE. Vol. 7021.
2. Suat Utku Ay. Large Format CMOS Image Sensors, Performance and Design // VDM Verlag Dr. Mueller, 2008.

УДК 621.389

Интегральная фотоника от видимого до среднего ИК-диапазона: технологии и приложения

Родионов И. А.^{1,2}¹ ВНИИА им. Н. Л. Духова

127030, г. Москва, ул. Суцешская, 22

² НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

irodionov@bmsu.ru

Представлены результаты разработки устройств и технологий оптоэлектроники на базе фотонных интегральных схем от видимого до среднего ИК-диапазона. Приведены параметры ФИС для секвенатора ДНК для длины волны 532 нм, элементы квантового оптического сопроцессора для длины волны 925 нм и матричные сопроцессоры для длины волны 1550 нм.

Ключевые слова: оптоэлектроника; фотонные интегральные схемы; нитрид кремния электронная литография; оптические вычисления; лидар; секвенаторы.

С развитием новых технологий, таких как интернет вещей (IoT), облачные вычисления, искусственный интеллект (AI) и машинное обучение (ML), устройства детектирования и измерения расстояний с помощью света (LiDAR), матричные и квантовые сопроцессоры растет необходимость в современных оптоэлектронных устройствах. Ключом к значительному увеличению плотности интеграции, уменьшению стоимости и энергопотребления является развитие технологий фотонных интегральных схем. В большом разнообразии материальных платформ, пригодных для создания фотонных интегральных схем, сильное распространение получили платформы на основе КНИ, InP и Si₃N₄. Уже сейчас на базе фотонных фабрик реализованы экосистемы с мультипроектными пластинами (MPW-run), технологии упаковки и сборки, обеспечивая стремительное развитие рынка фотонных интегральных схем. Несмотря на ограничения по созданию активных элементов и скоростей модуляции, нитрид кремния является наиболее оптимальной платформой для создания пассивных компонентов для большинства применений, так как обладает большим окном пропускания от 400 до 4000 нм, а также обладает одними из самых низких потерь на сегодняшний день при среднем уровне локализации [1]. Недостатки схем на нитриде кремния успешно преодолеваются при помощи гибридной или гетерогенной интеграции с фотонными схемами на базе A³B⁵, КНИ и LNOI (ниобат лития на изоляторе) [2]. Данные особенности нитрид-кремниевой платформы позволяют реализовывать масштабируемые и высокоэффективные фотонные интегральные схемы, находящие применения в видимом диапазоне (биофотоника, атомная и молекулярная физика, подводные лидары), ближнем инфракрасном диапазоне (квантовые технологии), коротковолновом инфракрасном диапазоне (телеком/датаком, лидары, нейроморфные процессоры), а также в средневолновом инфракрасном диапазоне (сенсорика) [3].

В НОЦ ФМНС разработан комплекс серийных технологий создания элементной компонентной базы устройств нанопотоники по оптимизированной технологии изготовления гибридных фотонных интегральных схем видимого и ближнего



ИК-диапазона из нитрида кремния на основе электронно-лучевой литографии. Для длины волны 925 нм потери на распространение менее 0,55 дБ/см, а потери на сопряжение не более 3 дБ [4]. Для длины волны 1550 нм параметры ФИС стремятся к ведущим мировым технологическим аналогам. Получены потери на распространение менее 0,10 дБ/см, потери на сопряжение до 0,15 дБ [5].

Литература

1. Puckett M. W., Liu K., Chauhan N., Zhao Q., Jin N., Cheng H., Wu J., Behunin R. O., Rakich P. T., Nelson K. D., Blumenthal D.J. // Nat. Commun., 2021. 12, 934.
2. Churaev M., Wang R. N., Riedhauser A., Snigirev V., Blésin T., Möhl C., Anderson M. H., Siddharth A., Popoff Y., Drechsler U., Caimi D., Hönl S., Riemensberger J., Liu J., Seidler P., Kippenberg T.J. // Nat. Commun., 2023. 14, 3499.
3. Buzaverov K. A. et al. Silicon nitride integrated photonics from visible to mid-infrared spectra // arXiv preprint arXiv:2405.10038 (2024).
4. Buzaverov K. A. et al. Low-loss silicon nitride photonic ICs for near-infrared wavelength bandwidth // Optics Express, 2023. 31.10. P. 16227–16242.
5. Avdeev S. S. et al. Tutorial on Silicon Photonics Integrated Platform Fiber Edge Coupling // arXiv preprint arXiv:2405.11980 (2024).

УДК 621.3.049.779

Центр Сколтеха по прототипированию устройств интегральной фотоники: результаты и перспективы на 2024–2030 гг**Денисов А. А.***АНООВО «Сколковский институт науки и технологий»**Центр исследовательской инфраструктуры**121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,**Большой бульвар, 30, стр. 1**a.denisov@skoltech.ru*

В рамках доклада будут представлены результаты и перспективы созданного в 2023–2024 годах в Сколтехе Центра по прототипированию устройств на базе фотонных интегральных схем (ФИС). Основное внимание будет уделено двум направлениям: разработке стандартизированной библиотеки компонентов (PDK) на базе отечественного программного обеспечения, а также интеграции источников оптического излучения с ФИС в единую систему на чипе.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; кремний на изоляторе; стандартизированная библиотека компонентов; контрактное производство; интеграция источников с ФИС.

В 2023–2024 годах на базе Центра исследовательской инфраструктуры Сколтеха запущен уникальный комплекс оборудования для прототипирования устройств на базе фотонных интегральных схем (ФИС) — более 30 единиц оборудования. Обеспечен замкнутый цикл создания интегрально-оптических устройств: кристалльное производство, участок сборки и участок измерений. Основной целью центра является создание в РФ площадки прототипирования изделий на базе ФИС — от телекоммуникационного оборудования и систем квантового распределения ключей до медицинских изделий, лидаров, оптоволоконных сенсорных систем и др. Технологии, разрабатываемые в Центре, ориентированы на совместимость с создаваемыми в РФ опытными производствами фотонных интегральных схем, тем самым обеспечивая бесшовный процесс разработки, тестирования и последующего производства высокотехнологичных продуктов в РФ.

В рамках доклада будут освещены ключевые возможности Центра и результаты его деятельности за последний год. Также будут представлены перспективные проекты в разработке. Ключевой технологией, разрабатываемой в Центре, является технология КНИ (кремний на изоляторе); под данную технологию в настоящий момент разрабатывается PDK (process design kit) — стандартизированная библиотека компонентов и набор правил проектирования для будущих разработчиков как компонентной базы высокотехнологичных оптоэлектронных устройств, так и самих устройств целиком. В состав PDK войдут не только пассивные (волноводы, интерференционные делители, интерферометры Маха—Цендера и др.), но и активные элементы, в первую очередь термо- и электрооптические модуляторы. Будут представлены первые экспериментальные образцы данных элементов, а также продемонстрированы результаты интеграции ряда элементов в PDK.

Ключевой особенностью РДК является то, что библиотека разрабатывается на базе программного обеспечения отечественного производства.

Помимо кристального производства в рамках доклада будут освещены возможности и результаты Центра по оптической интегральной сборке и тестированию фотонных интегральных схем на базе своего уникального комплекса сборочного и контрольно-измерительного оборудования. В частности, будут представлены первые результаты и дальнейшие планы по разработке методов интеграции источников оптического излучения с фотонными интегральными схемами в единую систему на чипе.

УДК 535.14

Дизайн, производство и применение фотонных интегральных схем в системах коммуникации и сенсорики

Казаков И. А.³, Галкин М. Л.³, Малахов К. М.³, к. ф.-м. н. Киселёв Ф. Д.^{1,2}, к. ф.-м. н. Самсонов Э. О.^{1,2}, к. т. н. Чистяков В. В.², д. ф.-м. н. Дорожкин П. С.³, к. ф.-м. н. Егоров В. И.^{1,2}, к. ф.-м. н. Певчих К. Э.⁴, д. ф.-м. н. Шипулин А. В.³

¹ ООО «СМАРТС-Кванттелеком»

199178, г. Санкт-Петербург, В.О., 6 линия, 59, корп. 1, лит. Б, пом. 17/6
info@quanttelecom.ru

² Национальный исследовательский университет ИТМО

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А

³ Сколковский институт науки и технологий

121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»
Большой бульвар, 30, стр. 1

⁴ АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Создана и протестирована цепочка дизайна, создания, тестирования и применения фотонных интегральных схем для систем оптической коммуникации (в том числе для системы квантовой коммуникации) и оптической сенсорики.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; оптические коммуникации; квантовая коммуникация; оптическая сенсорика.

Фотонные интегральные схемы (ФИС) в настоящее время заменяют собой дискретные компоненты в системах, использующих технологии фотоники. Основными областями для применения ФИС в настоящее время являются системы оптических коммуникаций (в том числе квантовых), системы оптической сенсорики (включая лидары) и системы оптических вычислений. Направление ФИС в настоящее время координируется на нескольких больших платформах, например в Европейском Союзе это направление координируется консорциумом EPIC [1].

В предлагаемом докладе анализируется технологический ландшафт в области создания и применения ФИС. Приведены данные о построенном полном цикле дизайна, производства, тестирования и применения ФИС в рамках доступных возможностей.

Будут показаны результаты тестирования высокочастотных модуляторов, созданных по собственному дизайну на основе технологии «кремний на изоляторе» (SOI) для оптических трансиверов.

Вопросы миниатюризации, снижению себестоимости при массовом производстве, а также повышения стабильности оптической схемы в реальных условиях эксплуатации для системы квантового распределения ключей (КРК) могут быть решены при переходе к применению ФИС [2].

Будут продемонстрированы результаты построения оптической сенсорной системы с использованием интеррогатора на основе ФИС [3].

Приводятся первые данные о создании лазера на основе кремния допированного германием.

В заключении обсуждаются вопросы создания полностью оптических нейронных сетей с использованием микрорезонаторов и полупроводниковых усилителей.

Литература

1. EPIC <https://epic-photonics.com>.
2. Sibson P., Erven C., Godfrey M. et al. Chip-based quantum key distribution // Nat. Commun., 2017. 8, 13984.
3. Kazakov I., Malakhov K. et al. Study of Operational Algorithm for Interrogator With Arrayed Waveguide Grating on a Photonic Integrated Circuit // Photonics, 2024. 18 (2).

УДК 621.3

Интегрируемые оптически активные элементы для фотонных интегральных схем

Криштоп В. Г.

¹ АО «ИнфоТеКС»

127287, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б

² Институт проблем технологии микроэлектроники РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна 6

³ Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

krishtop@iptm.ru

В данном докладе обсуждаются возможности создания интегрированных оптически активных элементов для задач квантового распределения ключей (лазеров, однофотонных источников, проходных усилителей, резонансных усилителей) в рамках доступных в России на сегодняшний день техпроцессов фотонных интегральных схем и гибридной сборки.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; квантовые коммуникации; квантовое распределение ключей.

В настоящее время в России активно развивается индустрия ФИС (фотонных интегральных схем). Технология ФИС проходит те же ступени развития, которые прошла кремниевая микроэлектроника на заре своего развития. Привлекательность использования ФИС определяется по сути теми же стимулами: повышение плотности интеграции, тиражность, технологичность и воспроизводимость/повторяемость, миниатюризация и удешевление единицы продукции. Естественное следствие этого развития — освоение новых областей применения и новых рынков.

При этом, частично благодаря тому, что импорту ФИС препятствуют санкции, наше государство инвестирует значительные средства в развитие технологий интегральной оптики внутри страны.

В России уже существует некоторое количество коммерческих производителей ФИС, производящих изделия на основе технологий кремниевой фотоники (SiO_2 , SiON , Si_3N_4 , SOI ...). С одной стороны, использование кремния выглядит привлекательно, поскольку позволяет эффективно использовать микроэлектронное оборудование предыдущих поколений с крупными технологическими нормами для решения актуальных задач. С другой стороны, источники излучения на кремнии растить особо не получается, и имеющиеся на данный момент российские ФИС преимущественно состоят из пассивных элементов. Таким образом, требуется развитие технологии ФИС на новых материалах: группа A^3B^5 , а также нелинейные кристаллы, самый известный из которых ниобат лития (отметим здесь, что в России выпускают модуляторы на ниобате лития).

Также необходимо совершенствовать технологии гибридной сборки применительно к ФИС, чтобы иметь возможность комбинировать элементы на базе разных материалов в рамках одного изделия.

В данном докладе обсуждаются возможности создания интегрированных оптически активных элементов (лазеров, однофотонных источников, проходных



усилителей, резонансных усилителей) в рамках доступных в России на сегодняшний день техпроцессов ФИС и сборки ФИС. Нам интересны ФИС для задач КРК (квантового распределения ключей), которые формируют, преобразуют и детектируют сигналы малой мощности. В коммерчески доступных в России на сегодняшний день системах КРК российского производства используется обмен однофотонными состояниями, поэтому выдвигаются требования к потерям в ФИС. С другой стороны, источники для систем КРК могут быть малой мощности.

В самой ближайшей перспективе, развитие технологий ФИС позволит заменять довольно объемные, дорогие, и технически сложные системы, собранные на дискретных оптических и оптомеханических компонентах, компактными, дешевыми, интегральными фотонными чипами. В нашем случае это, разумеется, интересно для применения в системах КРК, где довольно громоздкая и сложная в настройке оптическая схема может в ближайшем будущем стать компактной ненастраиваемой ФИС. Следующим шагом, естественно, будет расширение областей применения, внедрение во все более массовые изделия, удешевление в производстве, и опять расширение областей применения — и так по кругу. В конечном счете, ФИС для КРК должны появиться у каждого пользователя в домашнем роутере, мобильном телефоне, умном доме, датчиках ЖКХ, автомобиле, в документах и банковских картах, — т. е. заменить собой классическую асимметричную криптографию во всех сферах применения.

УДК 535.555

Сверхширокополосные интегрально-оптические модуляторы на основе ниобата лития: современное состояние и перспективы развития

Парфенов М. В., Варламов А. В., Ильичев И. В., Усикова А. А., Тронеv А. В., Агзуvов П. М., Шамрай А. В.

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
achamrai@yandex.ru*

Представлен обзор результатов ФТИ им. А. Ф. Иоффе в области интегральной фотоники на подложках ниобата лития. Рассматриваются различные интегрально-оптические модуляторы и их применение в телекоммуникациях, радиофотонике, оптических датчиках и квантовых информационных технологиях.

Ключевые слова: интегральная оптика; сверхширокополосные модуляторы; ниобат лития; радиофотоника; оптические коммуникации; оптические сенсоры; квантовые информационные технологии.

Ниобата лития, благодаря уникальным свойствам и хорошо отработанной технологии формирования оптических волноводов, предлагает широкие возможности по созданию интегрально-оптических устройств для управления оптическим излучением [1]. Отличительными особенностями интегральной фотоники на основе ниобата лития по сравнению с конкурирующими материальными платформами являются: способность работать с высокой оптической мощностью (несколько сотен милливатт), а также минимальные вносимые оптические шумы. Это определяет лидерство данной материальной платформы интегральной оптики при работе с аналоговыми сигналами (радиофотоника и оптические датчики), а также в области квантовых телекоммуникаций, где важно не разрушить заданное квантовое состояние света.

ФТИ им. А. Ф. Иоффе является одним из лидеров в области интегральной оптики на основе ниобата лития. В докладе представлен обзор последних результатов. Рассмотрены реализации различных видов сверхширокополосных оптических модуляторов: амплитудный модулятор Маха — Цендера, фазовый модулятор, модулятор сдвига частоты. Рассмотрены методы повышения характеристик модуляторов как за счет активной стабилизации и выбора рабочей точки [2], так и с использованием лазерной подгонки [3], не требующей систем управления с обратной связью. Представлены также первые результаты по изготовлению высокоэффективных сверхширокополосных модуляторов на основе тонкопленочного ниобата лития [4]. Данная технологическая платформа в настоящее время является одной из наиболее перспективных для создания модуляторов с полосой частот до 100 ГГц и выше.

Представлены примеры эффективного применения модуляторов на основе ниобата лития в различных оптико-информационных системах. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития интегральной фотоники на основе ниобата лития, в частности применение в квантовых информационных технологиях и увеличение степени интеграции при использовании гибридных тонкопленочных подложек.

В настоящее время совместно с АО «ОКБ-Планета» активно ведутся работы по внедрению полученных научных результатов в производство. Данные работы финансируются РНФ, Проект № 24-91-22001 на выполнение ориентированных и прикладных научных исследований в рамках стратегических инициатив Президента Российской Федерации в научно-технологической сфере в области производства приборов СВЧ и терагерцового диапазона (в части чипов и микроэлектронных составляющих).

Литература

1. Петров В. М., Агрозов П. М., Лебедев В. В., Ильичев И. В., Шамрай А. В. Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития // УФН, 2021. — Т. 191. — С. 760–780.
2. Agruzov P., Parfenov M., Tronev A., Varlamov A., Ilichev I., Usikova A., Shamrai A. Electronic System of Remote Optical Control of LiNbO₃ Mach-Zehnder Modulator Operating Point. *Electronics*, 2023; 12(1):206. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12010206>.
3. Tronev A. V., Parfenov M. V., Bozhko S. I., Ionov A. M., Mozhchil R. N., Chekmazov S. V., Agruzov P. M., Ilichev I. V., Shamrai A. V. Local laser oxidation of titanium film for the post-fabrication trimming of photonic integrated circuits // *Opt. Mater. Express*, 2022. Vol. 12. P. 4072–4087. URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OME.465690>.
4. Parfenov M., Agruzov P., Tronev A., Ilichev I., Usikova A., Zadiranov Y., Shamrai A. Metal Electrodes for Filtering the Localized Fundamental Mode of a Ridge Optical Waveguide on a Thin Lithium Niobate Nanofilm // *Nanomaterials* 2023, 13, 2755. URL: <https://doi.org/10.3390/nano13202755>.

УДК 621.737.826

Принципы построения и создание компактных и эффективных источников сверхкоротких лазерных импульсов на основе полупроводниковых гетероструктур

Слипченко С. О.¹, Шушканов И. В.¹, Подоскин А. А.¹, Багаев Т. А.²,Мармалюк А. А.², Ладугин М. А.², Пихтин Н. А.¹¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

serghpl@mail.ioffe.ru

² АО «НИИ «Полус» им М. Ф. Стельмаха»,

117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1

Рассмотрены основные подходы для создания компактных и эффективных источников сверхкоротких лазерных импульсов на основе полупроводниковых гетероструктур. Представлены экспериментальные результаты по созданию источников мощных суб-нс импульсов и оптоволоконных модулей на основе полупроводниковых лазеров.

Ключевые слова: полупроводниковые лазеры; импульсные лазеры; оптоволоконные модули; ЛИДАР.

Существует широкий спектр задач, где востребованы компактные и эффективные источники мощных лазерных импульсов с длительностью 10–100 пс. К основным направлениям можно отнести: (1) ЛИДАРЫ и лазерные дальномеры времяпролетного типа, (2) системы беспроводной передачи информации, (3) научные системы исследования динамических характеристик. Особая актуальность мощных и компактных сверхкороткоимпульсных источников в последнее время обусловлена потребностями развития систем беспроводной коммуникации, в частности в рамках группировок малых и сверхмалых спутников, когда габариты и энергетическая эффективность являются определяющим фактором. Для каждого из указанных направлений должен существовать свой уникальный набор характеристик, который включает спектральные характеристики излучения, длительность и форму импульса, пиковую мощность и частоту повторения, массогабаритные характеристики источника, энергетическая эффективность. Использование лазерных источников на основе полупроводниковых гетероструктур позволяет гибко варьировать указанными параметрами и обеспечивать уникальную комбинацию в части эффективности, компактности, выбора спектральных характеристик по сравнению с твердотельными или волоконными лазерами.

К основным подходам для генерации мощных сверхкоротких лазерных импульсов можно отнести два ключевых подхода: (1) модуляция усиления и (2) синхронизация мод. В рамках первого подхода реализуемы длительности импульса от нескольких десятков до сотен пс, при этом нет ограничений к конструктивным особенностям кристаллов лазерных диодов, что позволяет получать высокие излучающие пиковые мощности Вт уровня. Для второго подхода доступные длительности импульсов находятся в диапазоне от единиц до десятков пс, а частоты повторения от единиц до сотен ГГц. Однако такие решения возможны только для маломощных одномодовых источников лазерного излучения. Но несмотря на это



подобные источники являются перспективными для создания оптических АЦП, высокостабильных генераторов тактовых частот.

В докладе будет дан обзор актуальных достижений в области источников сверхкоротких лазерных импульсов, а также представлены результаты разработок ФТИ им. А. Ф. Иоффе для данной области [1–5]. В частности будут впервые представлены интегральные сверхкомпактные источники на основе быстродействующих токовых ключей, обеспечивающие пиковые мощности более 20 Вт при длительностях импульса 100 пс. Будут представлены результаты разработок генераторов непрерывных последовательностей с частотами до 10 ГГц и длительностями импульсов до 10 пс.

Литература

1. Подоскин А. А. и др. Лазерные диоды (850 нм) на основе асимметричной Al-GaAs/GaAs-гетероструктуры с объемной активной областью для генерации мощных субнаносекундных оптических импульсов // Квант. электрон., 2023. — Т. 53. — С. 1–5.
2. Slipchenko S. O. et al. Multiple increase in the radiative efficiency of 1060-nm laser diodes based on heterostructures with tunnel-coupled injection and a single waveguide mode. *Opt. Lett.*, 2023. Vol. 48. P. 203–206. URL: <https://doi.org/10.1364/OL.476248>.
3. Slipchenko S. O. et al. Tunnel-Coupled Laser Diode Microarray as a kW-Level 100-ns Pulsed Optical Power Source ($\lambda = 910$ nm) // *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2022. Vol. 34. P. 35–38. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2021.3134370>.
4. Слипченко С. О. и др. Источник мощного импульсного лазерного излучения (1060 нм) с высокой частотой следования импульсов на основе гибридной сборки линейки лазерных диодов и 2D массива оптодиодов как высокоскоростного токового ключа // Квант. электрон., 2023. — Т. 53. — С. 11–16.
5. Slipchenko S. O. et al. High-Power and Repetition Rate Nanosecond Pulse Generation in Diode Laser-Thyristor Stacks // *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2021. Vol. 33. P. 11–14. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2020.3040026>.

УДК 621.373.826

Высококогерентный одночастотный лазерный источник на основе активных и пассивных фотонных интегральных схем

Артемов Д. Е.^{1,2}, Кондаков А. А.¹, Фомиряков Э. А.¹, Наний О. Е.^{1,2},
Трещиков В. Н.¹, Федосеев А. И.²

¹ ООО «Т8»

107076, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1

Artemov.de@t8.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Разработан высококогерентный одночастотный лазерный источник с использованием двух фотонных интегральных схем. Гибридная стыковка позволила получить стабильный одночастотный режим генерации с коэффициентом подавления боковых мод вплоть до 52 дБ и возможностью перестройки центральной длины волны.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; высококогерентный лазер; высокочастотные микрокольцевые резонаторы; стабилизация лазерного излучения.

Ожидается, что массовое использование фотонных интегральных схем уже в ближайшее время обеспечит столь же ощутимый рывок в развитии и применении оптоэлектронных компонентов и систем на их основе [1], какой ранее совершило массовое внедрение электронных интегральных схем в развитии и применении электроники. Одно из применений фотонных интегральных схем — высококогерентные одночастотные лазерные источники на основе внешних высокочастотных микрокольцевых резонаторов (МКР) [2].

Разработана компактная конструкция высококогерентного одночастотного лазерного источника с внешним микрокольцевым резонатором в составе фотонной интегральной схемы. Схема собранного лазерного источника изображена на рис. 1. В рамках его разработки спроектированы образцы высокочастотных микрокольцевых резонаторов на основе технологии SiN/SiO₂. По результатам измерения значений добротности и коэффициента отражения резонансов выбран один МКР, используемый для стабилизации лазерного излучения.

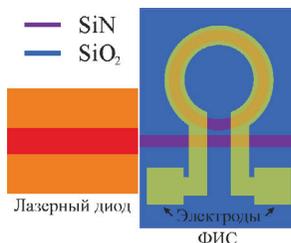


Рис. 1. Схема стыковки лазерного диода с внешней фотонной интегральной схемой



Экспериментально исследованы режимы генерации лазера путем вариации тока накачки диода I_D и напряжения U_R нагревательного элемента МКР при фиксированной температуре общего термоэлектрического модуля охлаждения (ТЭМО). Показана возможность стабильной генерации в одночастотном режиме с различными значениями коэффициента подавления боковых мод (SMSR) и центральной длины волны. На рис. 2 изображены зависимости SMSR, относительной оптической мощности P и центральной длины волны λ_c спектра излучения при различных значениях U_R и I_D . Динамический диапазон по U_R — 2 В, по I_D — 50 мА. На карте SMSR (рис. 2а) видны полосы, характеризующие одночастотные режимы генерации с высоким SMSR. Этим областям соответствуют такие же полосы на карте P (рис. 2б) и λ_c (рис. 2в). Причем в одночастотном режиме (режиме захвата) наблюдается провал мощности P (рис. 2б) в сравнении с многочастотным режимом, при котором SMSR мал, а P относительно велика. Также в режиме захвата отсутствуют резкие скачки центральной длины волны λ_c внутри каждой полосы (рис. 2в).

Фазовые шумы измерялись методом автогетеродинамирования [3] с линией задержки 1 км при фиксированных значениях параметров, соответствующих максимальному SMSR (52 дБ). Минимальное измеренное значение мгновенной (лоренцевской) ширины линии не превышает 1 кГц.

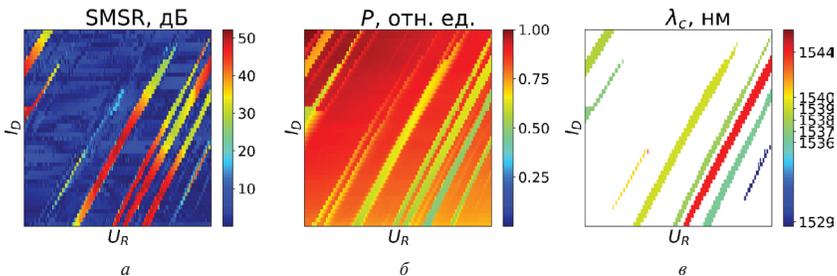


Рис. 2. а) Карта значений коэффициента подавления боковых мод (SMSR);
 б) карта значений оптической мощности на выходе из ФИС;
 в) карта значений центральной длины волны одночастотных режимов генерации с SMSR > 20 дБ

Литература

1. Xiang C., Jin W., Bowers J. E. Silicon nitride passive and active photonic integrated circuits: trends and prospects // *Photonics Research*, 2022. Vol. 10. № 6. P. A82–A96.
2. Kondratiev N. M. et al. Recent advances in laser self-injection locking to high-Q microresonators // *Frontiers of Physics*, 2023. Vol. 18. № 2. P. 21305.
3. Fomiryakov E. et al. New approach to laser characterization using delayed self-heterodyne interferometry // *Journal of Lightwave Technology*, 2021. Vol. 39. № 15. P. 5191–5196.

УДК 539. 23

Поликристаллические пленки ниобата лития: обзор и перспективы применения в интегральной фотонике

Перин А. С., Кузнецов И. В.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
anton.s.perin@tusur.ru*

Ниобат лития (LiNbO_3) играет важную роль в современной интегральной фотонике благодаря своим известным и, по ряду случаев, уникальным свойствам. В работе сравниваются характеристики и оценивается перспектива применения напыленных тонких пленок LiNbO_3 и тех, которые изготовлены широко распространенными методами: включая технологию управляемого скола, жидкофазную эпитаксию, химическое осаждение из паровой фазы, импульсное лазерное осаждение и молекулярно-лучевую эпитаксию.

Ключевые слова: ниобат лития; тонкая пленка; технология; фотонная интегральная схема; ФИС.

Ниобат лития (LiNbO_3) — сегнетоэлектрический материал, характеризующийся проявлением ряда физических эффектов: электрооптический, пьезоэлектрический, фоторефрактивный и пироэлектрический [1]. Благодаря своим уникальным свойствам LiNbO_3 имеет множество применений. На его основе изготавливают фотонные и оптоэлектронные устройства, например, генераторы второй гармоники, электрооптические и акустооптические модуляторы и датчики, элементы оперативной памяти (FeRAM) и другие устройства [2–4]. Учитывая современную тенденцию в фотонике — переход от устройств из объемных кристаллов к фотонным интегральным схемам (ФИС), получение тонких пленок LiNbO_3 (TFLN) становится актуальной задачей. ФИС на основе тонких пленок ниобата лития позволяют не только миниатюризировать устройство, но и улучшить ряд характеристик, таких как чувствительность, величину полуволнового напряжения и др.

Существует множество известных методов эпитаксии TFLN, таких как зольгель, импульсное лазерное осаждение (PLD), химическое осаждение из газовой фазы (CVD), жидкофазная эпитаксия (LPE), радиочастотное распыление (RFS) и высокочастотное магнетронное распыление (RFMS) [5–7]. Однако не все эти методы подходят для нанесения TFLN на полупроводниковую подложку. В последнее время одним из наиболее перспективных методов получения TFLN является метод управляемого скола кристалла в сочетании с технологией склеивания пластин. В литературе этот метод широко известен как метод smart cut.

Smart cut метод использует процесс ионной имплантации ионов гелия в подложку LiNbO_3 для формирования TFLN. Этот метод позволяет получать TFLN с шероховатостью поверхности около 4 нм [8]. К недостаткам smart-cut можно отнести то, что для изготовления тонких пленок таким методом требуется применение сложного технологического процесса и применения дорогостоящего оборудования для имплантации ионов гелия. Для получения пленки определенной толщины требуется выполнить имплантацию ионов гелия на требуемую глубину. Вместе с тем, максимальная глубина имплантации ограничивается энергией имплантации используемого оборудования. Кроме того, этот метод требует механического



шлифовального оборудования для уменьшения шероховатости поверхности, что важно, поскольку влияет на величину потерь в оптических волноводах.

Методы распыления являются альтернативой для изготовления TFLN. В отличие от метода *smart cut*, методы распыления не требуют дорогостоящего оборудования. Методы распыления позволяют наносить тонкие однородные пленки LiNbO_3 и контролировать их толщину и стехиометрию с высокой вариабельностью параметров осаждения. Эти параметры влияют на химический состав, а также кристаллическую структуру и свойства тонкой пленки.

Напыленные TFLN имеют как преимущества, так и недостатки. Преимущества методов распыления включают относительно низкую температуру процесса (около 500°C) и отсутствие необходимости использования прекурсоров. Очевидным недостатком напыленных TFLN является их поликристаллическая структура, что требует осуществление контроля ориентации пленок путем подбора ориентированной подложки и параметров осаждения. Кроме того, такая структура обуславливает дополнительные оптические потери в результате рассеяния света на дефектах поверхности и из-за отражений на границах между кристаллитами [5].

Таким образом, распыленные TFLN имеют как потенциальные преимущества, так и недостатки. Спорным остается вопрос, оказывают ли недостатки распыленных TFLN существенное влияние на их свойства и пригодность для интегральной фотоники в тех приложениях, где, например, потери энергии света не являются приоритетными. Целью данной работы является оценка возможности применения распыленных TFLN в интегральной фотонике.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2022-0004 «Исследование и разработка способов изготовления интегральных оптических волноводов и элементов на их основе»).

Литература

1. Boyd G. D., Miller R. C., Nassau K., Bond W. L., Savage A. LiNbO_3 : an efficient phase matchable nonlinear optical material // *Applied physics letters*, 1964. 5, 234–236.
2. Schröder M., Haußmann A., Thiessen A., Soergel E., Woike T., Eng L. M. Conducting domain walls in lithium niobate single crystals // *Advanced functional materials*, 2012. 22, 3936–3944.
3. Poberaj G., Hu H., Sohler W., Guenter P. Lithium niobate on insulator for micr-ophotonic devices // *Laser & photonics reviews*, 2012. 6, 488–503.
4. Sarabalís C. J., McKenna T. P., Patel R. N., Laer R., Naeini A. H. Acousto-optic modulation in lithium niobate on sapphire // *Apl. Photonics*, 2020. 5, 086104.
5. Sumets M. P., Dybov V. A., Ievlev V. M. LiNbO_3 films: potential application, synthesis techniques, structure, properties // *Inorganic Materials*, 2017. 53, 1361–1377.
6. Wang L. H., Yuan D. R., Duan X. L., Wang X. Q., Yu F. P. Synthesis and characterization of fine lithium niobate powders by sol-gel method // *Journal of Experimental and Industrial Crystallography*, 2007. 42, 321–324.
7. Akiyama Y., Shitanaka K., Murakami H., Shin Y. S., Yoshida M., Imaishi N. Epitaxial growth of lithium niobate film using metalorganic chemical vapor deposition // *Thin Solid Films*, 2007. 515, 4975–4979.
8. Sulser F., Poberaj G., Koechlin M., Günter P. Photonic crystal structures in ion-sliced lithium niobate thin films // *Optics Ex-press*, 2009. 17, 020291.

УДК 621.3.049.779

Разработка пассивных, перестраиваемых и активных элементов фотонных интегральных схем на основе кремния**Орликовский Н. А.¹, Габидуллин А. Р.¹, Желтиков В. А.¹, Сороковых Д. Е.¹, Архипов С. В.¹, Аббасов Т.¹, Шишкин А. В.¹, Тюлькова А. А.¹, Лихачев Б. В.², Гаврилов К. А.², Денисов А. А.¹**¹ АНООВО «Сколковский институт науки и технологий»*Центр исследовательской инфраструктуры**121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,**Большой бульвар, 30, стр. 1**n.orlikovskiy@skoltech.ru*² ООО «Дифра Лаб»*614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15*

В докладе описываются методы и подходы к проектированию и изготовлению элементов фотонных интегральных схем на основе кремниевых гетероструктур. Предложенные методы верификации моделирования основаны на зондовых измерениях интегральных схем: измерении вносимых потерь, спектров поглощения, рефлектометрии и др. Предложены методы создания библиотечных элементов и интеграции лазерных источников.

Ключевые слова: кремниевая интегральная фотоника; интегральные технологии; Multi Project Wafer; Process Design Kit.

Кремниевая интегральная фотоника уже более 20 лет постепенно заменяет собой микроэлектронные узлы в различных устройствах связи и сенсорике. Наличие электрооптического эффекта и высокий коэффициент преломления позволяет создавать компактные оптические устройства, функционирующие на частотах в десятки гигагерц. Микроэлектронные производства уже много лет при работе с заказчиком использует формат MPW (multi project wafer) [1, 2], когда на одной пластине формируются топологии для нескольких заказчиков, а значит и стоимость технологического процесса заказчики делят между собой. Такой подход означает необходимость формирования всех элементов по одному технологическому процессу, а значит и элементы должны быть стандартизованы. В фотонике добавленная стоимость изготовления высока, объемы изготовления меньше, чем в микроэлектронике, а количество заказчиков в РФ много меньше, чем заказчиков на устройства микроэлектроники. Предоставление заказчику стандартизированной библиотеки базовых элементов становится необходимостью. При подготовке дизайна проектировщик, используя известные элементы, точно и быстро прогнозирует свойства устройства без ущерба функционалу.

Процесс разработки таких элементов библиотеки складывается из проведения последовательных этапов моделирования, изготовления, тестирования. Такой цикл разработки может быть повторен несколько раз в зависимости от степени совпадения модели с экспериментом.

Моделирование элемента заключается в расчете распространения электромагнитного излучения с учетом геометрии элемента. В модель вводятся определенные экспериментально оптические характеристики используемых материалов как исходные данные. Заранее исследованные технологические геометрические



допуски добавляются в модель для понимания допустимой ошибки изготовления и диапазона колебания оптических параметров элемента. Такой подход позволит оценить стабильность работы системы.

В описываемой работе изготовление элементов проводилось с использованием стандартных планарных КМОП-совместимых методов обработки полупроводниковых КНИ пластин [3, 4]. К таким методам относится оптическая литография, плазмохимическое сухое травление, плазмохимическое осаждение из газовой фазы и другие методы. При разработке каждого метода проводилось сравнение расчетного допуска и технологического для оценки соответствия модели и реального изготовленного элемента.

Изготовленные элементы оптически характеризовались на автоматической зондовой станции методом измерения вносимых, отраженных потерь и рефлектометрии. Такой набор данных позволяет получить и спектральные характеристики, и пространственно-временные свойства волноводных структур.

Однако все описываемые методы не решают проблемы создания источника лазерного излучения на кремниевой ФИС. На основе кремния нет возможности на сегодня создать источник лазерного излучения, который бы входил в состав интегральной схемы. Для решения этой проблемы в работе представлены подходы к интеграции микроразмерных полупроводниковых A^3B^5 лазерных источников позволяющих в дальнейшем выполнять корпусирование интегральной схемы вместе с источником лазерного излучения.

Литература

1. <https://smartphotonics.nl/blog/what-is-a-process-design-kit>.
2. <https://www.aimphotonics.com/pdk>.
3. Chrostowski L. and Hochberg M. Silicon Photonics Design: From Devices to Systems. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2015.
4. Chrostowski L. et al. Silicon photonic circuit design using rapid prototyping foundry process design kits // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019. Vol. 25. № 5. P. 1–26.

УДК 621.3.049.779

Технологическая платформа для прототипирования устройств кремниевой фотоники

Габидуллин А. Р.¹, Желтиков В. А.¹, Шишкин А. В.¹, Тюлькова А. А.¹, Орликовский Н. А.¹, Архипов С. В.¹, Сороковых Д. Е.¹, Аббасов Т.¹, Лихачев Б. В.², Гаврилов К. А.², Денисов А. А.¹

¹ АНООВО «Сколковский институт науки и технологий»

Центр исследовательской инфраструктуры

121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,

Большой бульвар, 30, стр. 1

a.gabidullin@skoltech.ru

² ООО «Дифра Лаб»

614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

В рамках создания стандартизированной библиотеки компонентов в докладе будут представлены текущие технологические возможности прототипирования устройств интегральной фотоники Центра исследовательской инфраструктуры Сколтеха на примере базовых пассивных и активных элементов ФИС. На основе моделирования как на элементном, так и системном уровне разработаны базовые ячейки слоев фотолитографии и сформулированы требования к технологическим операциям. Изготовление элементов ФИС проводилось на основе операций лазерной многолучевой литографии и реактивного ионного травления.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; кремний на изоляторе; стандартизированная библиотека компонентов; активные и пассивные компоненты интегральной фотонной схемы.

В последнее десятилетие в России возник чрезвычайно высокий исследовательский интерес к технологиям интегральной кремниевой фотоники, которая позволяет радикально миниатюризировать оптические и фотонные компоненты на базе уже существующих КМОП-технологий [1]. Такая технология позволяет осуществлять генерацию, маршрутизацию, упорядочивание, модуляцию и детектирование оптического сигнала в кремнии на одном чипе, тем самым образуя оптический аналог электронных интегральных схем — фотонную интегральную схему (ФИС). Однако степень интеграции и количество фотонных компонентов для оптических интегральных схем с годами не стало расти, как для микроэлектроники, а ограничения отдельных материалов приводят к необходимости использования гибридных сборок и индивидуальной обработке отдельных чипов. Это влечет за собой повышение стоимости изготовления устройств на основе ФИС.

В мировой практике применяется вариант производства Multiple Project Wafer (MPW), когда на одной технологической пластине изготавливается одновременно несколько различных ФИС, разработанных разными командами на одной платформе. Это позволяет сделать процесс изготовления интегральной схемы дешевле и проще для исследователя [2]. Формат изготовления MPW подразумевает наличие библиотеки базовых элементов, которые имеют гарантированный уровень линейных потерь, эффективности ввода-вывода, величиной фазового сдвига, полосы пропускания и прочих в зависимости от самого элемента.



В таком случае проектирование фотонных интегральных схем сводится к компоновке схемы с использованием не только пассивных (волноводы, интерференционные делители, интерферометры Маха—Цендера и др.), но и активных элементов, в первую очередь термо- и электро-оптических модуляторов. Они позволяют управлять амплитудой и фазой оптического излучения в схеме. Среди различных физических механизмов модуляции оптических сигналов большая часть успешных модуляторов продемонстрированы на эффекте плазменной дисперсии за счет возможности значительного смещения показателя преломления (до значений порядка $\Delta n \sim 10^{-3}$) и модуляции на высоких частотах [3].

В докладе будут представлены текущие технологические возможности прототипирования устройств интегральной фотоники Центра исследовательской инфраструктуры Сколтеха на примере базовых пассивных и активных элементов ФИС. На основе моделирования как на элементном, так и системном уровне разработаны базовые ячейки слоев фотолитографии и сформулированы требования к технологическим операциям. Изготовление элементов ФИС проводилось на основе операций лазерной многолучевой литографии и реактивного ионного травления.

Литература

1. Chrostowski L. and Hochberg M. Silicon Photonics Design: From Devices to Systems. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2015.
2. Chrostowski L. et al. Silicon photonic circuit design using rapid prototyping foundry process design kits // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019. Vol. 25. № 5. P. 1–26.
3. Shekhar S. et al. Roadmapping the next generation of silicon photonics // Nature Communications, 2024. Vol. 15. № 1. P. 751.

УДК 621.3.049.779

Особенности технологий корпусирования управляемых фотонных интегральных схем на основе кремния

Архипов С. В., Орликовский Н. А., Габидуллин А. Р., Желтиков В. А., Сороковых Д. Е., Аббасов Т., Шишкин А. В., Тюлькова А. А., Денисов А. А.

АНООВО «Сколковский институт науки и технологий»

Центр исследовательской инфраструктуры

121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,

Большой бульвар, 30, стр. 1

S.Arkipov@skoltech.ru

Описаны основные методы корпусирования фотонных интегральных схем. Приведены типовые характеристики и конструкции корпусов, список основных типов оптических выводов и основные этапы монтажа ФИС. Даны рекомендации по выбору волоконных световодов и модулей на их основе. Описан пример технологии монтажа и тестирования волоконных выводов, кристалла ФИС.

Ключевые слова: интегрально-оптическая схема; кремний на изоляторе; нитрид кремния; корпусирование; оптическое волокно; монтаж волоконных выводов.

В настоящее время фотонные интегральные схемы (ФИС) находят все большее применение в области телекоммуникаций и измерительных системах. Одним из самых распространенных материалов, используемых для фотонных интегральных схем, является кремний. Кремний позволяет изготавливать не только сверхкомпактные интегральные пассивные ФИС, но и управлять фазой и/или амплитудой с частотой от единиц кГц до десятков ГГц. Одним из основных этапов изготовления конечного устройства на основе кремния является корпусирование [1, 2].

В качестве примера рассмотрены этапы процесса корпусирования прототипа перестраиваемого фильтра на основе ФИС (платформа — кремний на изоляторе). Эта работа выполнена специалистами Центра коллективного пользования «Чистые помещения для микро- и нанобработки» АНООВО «Сколковский институт науки и технологий».

Процесс корпусирования включает:

- Анализ параметров корпусируемой фотонной интегральной схемы. В ходе выполнения работ была разработана методика получения дисперсионной зависимости эффективного показателя преломления оптических волноводов ФИС;
- Выбор стандартного корпуса или проектирование нового с последующим его изготовлением;
- Выбор оптимальных характеристик волоконного ввода/вывода. Представлен использованный модуль на основе специального волоконного световода;
- Выбор таких используемых материалов, как адгезивы [3] и тип электрических проводников;
- Монтаж волоконного ввода/вывода;
- Монтаж кристалла ФИС в корпус;



- Монтаж электрических проводников;
- Герметизация корпуса.

Список факторов, влияющих на выбор используемого технологического, измерительного оборудования и сопутствующей оснастки включает в себя:

- технические требования к готовому устройству. Сборка устройств для проведения первичных испытаний и изготовление герметичных модулей может задействовать различные технологические операции.
- конструктивные особенности самого кристалла с ФИС. Размер чипа, расположение и тип электрических и оптических вводов/выводов формируют требования к корпусу, параметрам волоконных выводов и используемому оборудованию для их монтажа;
- рабочий диапазон оптических длин волн и характеристики управляющего электрического сигнала. Спектральные характеристики оптического излучения, требования к состоянию его поляризации на вводе ФИС влияют на выбор волоконных световодов, используемых адгезивов и применяемого вспомогательного оборудования (источники оптического излучения, измерители оптической мощности).

Литература

1. Giovan Battista Preve. Silicon Photonics Packaging Automation: Problems, Challenges, and Considerations // *Silicon Photonics III*. P. 237–259.
2. Tolga Tekin. Review of Packaging of Optoelectronic, Photonic, and MEMS Components // *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics*, 2011. Vol. 17. № 3. P. 704–718.
3. Yacobi B. G., Martin S., Davis K., Hudson A., Hubert M. Adhesive bonding in microelectronics and photonics // *Journal of applied physics*, 2002. Vol. 91. № 10. P. 6227–6262.

УДК 681.787.6

Неразрушающий контроль элементной базы фотоники методами спектральной интерферометрии

Забалуева З. А., Кулик Д. Д., Парра Орельяна Ф. А., Завалишина Л. Д., Маркварт А. А., к. ф.-м. н., Ушаков Н. А., д. ф.-м. н.
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
n.ushakoff@spbstu.ru*

Предложены методы визуализации трехмерной внутренней структуры многослойных прозрачных и полупрозрачных объектов. Разработаны принципы регистрации и демодуляции интерференционных сигналов, обеспечивающие улучшение пространственного разрешения до 1 мкм, обсуждается возможность его дальнейшего улучшения.

Ключевые слова: спектральная интерферометрия; неразрушающий контроль; фотонные интегральные схемы; оптические волокна.

Интерферометрические методы лежат в основе наиболее прецизионных измерительных систем, созданных человечеством [1]. В основе методов спектральной интерферометрии лежит измерение интерференционного сигнала как функции частоты оптического излучения, при этом возникает возможность нахождения не только относительного изменения фазовой задержки, но и абсолютной величины разности оптических путей интерферирующих волн [2]. Одним из применений спектральной интерферометрии к визуализации внутренней структуры различных объектов является оптическая когерентная томография (ОКТ), в рамках которой возможно неинвазивного и неразрушающего получения одно-, двух- и трехмерных изображений прозрачных и полупрозрачных объектов и тканей [3]. Одним из существенных ограничений является пространственная разрешающая способность, составляющая около 5–15 мкм, что недостаточно для визуализации внутренней структуры фотонных и электронных интегральных схем, оптических волокон. Пространственная разрешающая способность ОКТ методов определяется геометрическими и спектральными параметрами зондирующего излучения, а также хроматической дисперсией исследуемого объекта [4].

В работе развиты новые подходы реализации систем ОКТ, использующие введение вспомогательной модуляции излучения, которые позволяют производить регистрацию сигналов сразу нескольких измерительных зондов. С одной стороны, это позволяет устранить погрешности механического сканирования зонда на точность визуализации, а также повысить скорость измерений. С другой стороны, комбинация разработанного подхода мультиплексирования измерительных зондов с использованием пучков различной структуры в различных зондах позволила улучшить поперечную пространственную разрешающую способность до величин порядка 1 мкм. Для улучшения продольной разрешающей способности ОКТ до сравнимого уровня разработаны методы компенсации влияния хроматической дисперсии образца, а также применены методы параметрической спектральной оценки для демодуляции интерференционных сигналов.

Проведена экспериментальная верификация метода на примере измерения структуры оптических волокон различных типов, оптических модуляторов



на основе ниобата лития и кремниевых интегральных схем. За счет использования зонжирующего излучения с длиной волны более 1,2 мкм максимальная глубина визуализации в полупроводниковых материалах составила около 1 мм и ограничена спектральным разрешением использованного спектрометра. Разработаны физико-математические модели, описывающие формирование интерференционных сигналов в ОКТ системах при визуализации сильно и слабо рассеивающих объектов. На основе данных моделей и теоретических расчетов определены требования к параметрам установки для достижения пространственного разрешения на уровне 100 нм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-72-10095, <https://rscf.ru/project/23-72-10095>.

Литература

1. Aasi J., Abadie J., Abbott B. P., Abbot R., Abbot T. D. et al. Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light // *Nature Photonics*, 2013. Vol. 7. № 8. P. 613–619.
2. Прецизионные оптические измерения с использованием спектральной интерферометрии дисс. ... д-ра. физ.-мат. наук: 1.3.4.: защищена 22.12.23: утв. 08.05.24 / Ушаков Н. А. — СПб, 2023. — 265 стр. — Библиогр. — С. 217–250.
3. Huang D., Swanson E. A., Lin C. P., Joel J. S., Stinson W. G. et al. Optical coherence tomography // *Science*, 1991. Vol. 254. № 5035. P. 1178–1181.
4. Ушаков Н. А., Маковецкая Т. А., Маркварт А. А., Лиокумович Л. Б. Теоретические основы квантовой спектральной оптической когерентной томографии с частотным сканированием // *Письма в ЖЭТФ*, 2023. — Т. 117. — № 1. — С. 29–36.

УДК 621.3.049.779

Особенности контроля спектральных параметров фотонных интегральных схем при серийном производстве

Левин Д. Д., Васенов М. О., Стебельков А. Н.

*АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»**124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6**levin.denis@aozntc.ru*

Ключевые слова: Фотонные интегральные схемы; межоперационные контроль; потери в оптическом слое.

С каждым годом увеличиваются требования к скорости передачи информации, что делает актуальным разработку фотонных интегральных схем (ФИС), позволяющих реализовать требуемые характеристики. Серийный выпуск устройств на основе ФИС сопряжен с разбросом параметров волноводных слоев по пластине, в связи с техническими особенностями технологического оборудования. Эффективный контроль характеристик оптических слоев, а также быстрая отбраковка кристаллов ФИС на этапе пластины является актуальной задачей. АО «ЗНТЦ» уже завершил постановку серийного изготовления пассивной ФИС AWG мультиплексора DWDM диапазона на своем кристалльном производстве, и разработал конкретные решения по контролю и отбраковке изготавливаемых кристаллов, позволяющие повысить выход годных в партии.

Использование в качестве волноводного слоя SiON, обусловлено возможностью относительно простого изготовления волноводов с размерами до 5×5 мкм с низкой контрастностью порядка 0,7%, что не требует высокоразрешающей фотолитографии и позволяет снизить потери на ввод/вывод оптического излучения за счет согласованности оптических мод подводимых оптоволокон и волноводов на кристалле ФИС. За счет большого размера кристалла может наблюдаться разброс параметров коэффициента преломления и толщины. Это приводит к существенной неоднородности, например, оптических потерь и сдвига центральной длины волны каналов AWG мультиплексора.

Была разработана технология для быстрой отбраковки кристаллов, в которой AWG мультиплексоры расположены в виде вертикальных полос на пластине. Это позволяет нарезать пластину на отдельные полоски после формирования всех функциональных слоев, в которых выходы оптических волноводов располагаются на торцах по краям кристалла, обеспечивая возможность торцевого ввода оптического излучения с помощью волоконных V-Groove массивов оптоволокон (Fiber Array V-Groove — FAV). Для повышения скорости отбраковки кристаллов AWG мультиплексора в таких полосках была разработана установка для тестирования, в которой полоска с кристаллами устанавливается в специальной оснастке — держателе, а подвод FAV к входному/выходному торцу оптоволокон осуществляется с помощью автоматизированных 6-координатных позиционеров. Управляющее программное обеспечение позволяет выровнять FAV относительно волноводов по сигналу обратной связи с измерителя мощности. При этом возможна реализация различных алгоритмов поиска максимума интенсивности оптического излучения, что позволяет гибко настроить тестирование кристалла. На данный момент



начальный подвод осуществляется по заранее прописанному «рецепту», набору команд, с заранее найденными координатами начальных положений держателя FAV относительно волноводов первого измеряемого кристалла. Внедрение технологии компьютерного зрения позволит существенно сократить время начального подвода и упростить операцию контроля для оператора. Измерение спектральных характеристик исследуемого кристалла осуществляется с помощью перестраиваемого лазера в диапазоне длин волн 1525–1565 нм, что соответствует частотному диапазону AWG мультиплексора. Дальнейшее измерение кристаллов осуществляется последовательно один за другим путем сдвига держателя полоски на заданный интервал. На выходе мы получаем протокол отбраковки, в котором указываются основные параметры спектральных характеристик каждого кристалла и номера бракованных кристаллов.

Технология последовательного измерения кристаллов ФИС при серийном производстве позволяет провести быструю отбраковку, что сокращает время до 5–7 мин./крист. и позволяет еще на моменте изготовления кристалла оценить оптические параметры, которые потом можно сравнить с готовым изделием и оценить их деградацию при сборке и корпусировании готового изделия.

УДК 535.93

Твердотельные сканирующие системы для лидаров на основе фотонных интегральных схем

Бузаверов К. А.^{1,2}, Бабурин А. С.^{1,2}, Сергеев Е. В.^{1,2}, Авдеев С. С.^{1,2},
Лотков Е. С.^{1,2}, Букатин С. В.², Степанов И. А.², Крамаренко А. Б.²,
Амирасланов А. Ш.², Евсеева А. Р.², Шмонина О. И.², Рыжиков И. А.^{2,3},
Родионов И. А.^{1,2}

¹ ВНИИА им. Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22
kirillbuz@bmstu.ru

² НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

³ Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН
125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 6

В работе представлено моделирование оптических фазированных антенн решеток на основе фотонных интегральных схем. Показаны технологические возможности и особенности технологии нитрид кремния на изоляторе. Представлены макетные образцы различных типов твердотельных сканирующих систем.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; лидары; оптические потери; нитрид кремния.

Устройства управления лазерным лучом являются основным компонентом в лидарных системах, оптической беспроводной связи и биомедицинских приложениях [1]. На текущий момент, наибольшее распространение получили механические методы управления лучом, основанные на вращающихся зеркалах или МЭМС-устройствах. В последнее время активно исследуются методы управления лучом при помощи оптических фазированных антенных решеток (ОФАР) на основе фотонных интегральных схем (ФИС) [2]. Управление лучом в ОФАР основано на взаимной интерференции и изменении относительной разности фаз между отдельными излучателями. Благодаря отсутствию движущихся частей ОФАР могут обеспечить более быстрое управление лучом, а также имеют преимущество в виде большей устойчивости к вибрациям по сравнению с механическими аналогами. Более того, использование технологии фотонных интегральных схем позволяет уменьшить размеры, вес и энергопотребление датчиков, использующих управление лучом [3].

Одной из перспективных интегральных оптических платформ является нитрид кремния на изоляторе. Несмотря на ограничения в изготовлении активных устройств, нитрид кремния (Si_3N_4) является наиболее оптимальным материалом для пассивных ФИС для большинства приложений благодаря широкому окну пропускания от 400 до 4000 нм, совместимости с КМОП-технологией и самым низким потерям на распространение на сегодняшний день [4].

В данной работе рассмотрены основные типы конструкций ОФАР и методы управления лучом в ФИС на основе нитрида кремния для видимого, ближнего и коротковолнового ИК-диапазона. Проведено численное моделирование ОФАР на основе торцевых и решетчатых излучателей с линиями задержки для пассивного



управления лучом в одной и двух плоскостях с углом обзора более 20° и разрешением менее 5° . Разработана технология изготовления ФИС на нитриде кремния, включающая в себя этапы синтеза оптических слоев, прецизионные процессы электронно-лучевой литографии и плазмохимического травления, а также формирование структур для ввода и вывода излучения [5, 6]. Изготовлены тестовые фотонные чипы с потерями на распространение в волноводах менее $0,15$ дБ/см на длине волны 1550 нм, потерями на ввод/вывод менее 1 дБ для ввода в торец и менее 6 дБ для ввода в дифракционные решетки. Спроектирован измерительный стенд для демонстрации управления лазерным лучом. Изготовлены макетные образцы твердотельных сканирующих систем на основе ОФАР, обеспечивающие пассивное управление лучом в диапазоне 1500 – 1600 нм с углом обзора $15,8^\circ$ и разрешением $6,2^\circ$.

Литература

1. Li N. et al. A Progress Review on Solid-State LiDAR and Nanophotonics-Based LiDAR Sensors // *Laser Photonics Rev.*, 2022. Vol. 16. 2100511.
2. Kim I. et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology // *Nat. Nanotechnol.*, 2021. Vol. 16. P. 508–524.
3. Gagino M. et al. Integrated optical phased array with on-chip amplification enabling programmable beam shaping // *Sci. Rep.*, 2024. Vol. 14. 9590.
4. Buzaverov K. A. et al. Silicon nitride integrated photonics from visible to mid-infrared spectra // arXiv:2405.10038. 2024.
5. Buzaverov K. A. et al. Low-loss silicon nitride photonic ICs for near-infrared wavelength bandwidth // *Opt. Express*, 2023. Vol. 31. P. 16227–16242.
6. Avdeev S. S. et al. Tutorial on Silicon Photonics Integrated Platform Fiber Edge Coupling // arXiv:2405.11980. 2024.

УДК 535.93

Электрооптическая модуляция для фотонных матричных процессоров

Бабурин А. С.^{1,2}, Бузаверов К. А.^{1,2}, Сергеев Е. В.^{1,2}, Авдеев С. С.^{1,2},
Лотков Е. С.^{1,2}, Букатин С. В.², Степанов И. А.², Крамаренко А. Б.²,
Амирасланов А. Ш.², Евсеева А.², Шмонина О. И.², Рыжиков И. А.^{2,3},
Родионов И. А.^{1,2}

¹ ВНИИА им. Н. Л. Духова

127030, г. Москва, ул. Сушевская, 22

kirillbuz@bmstu.ru

² НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

³ Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН

125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 6

В работе проведен обзор фотонных сопроцессоров для гибридных суперкомпьютерных вычислений, представлены варианты реализации электрооптической модуляции для фотонных интегральных схем на платформе из нитрида кремния. Показаны технологические возможности и результаты изготовления устройств.

Ключевые слова: фотонные сопроцессоры; нейроморфные вычисления; обработка изображений; электрооптическая модуляция; нитрид кремния.

Фотонные вычисления привлекают все большее внимание, как возможная платформа для увеличения производительности мощностей суперкомпьютерных вычислений. Существует два основных подхода к вычислениям на базе света: квантовые фотонные вычисления и нейроморфные фотонные вычисления. Оба этих подхода могут быть реализованы с использованием матричного сопроцессора на основе сеток интерферометров Маха—Цендера [1]. Для эффективной работы этих систем требуются устройства электрооптической модуляции. В данном докладе будут рассмотрены основные реализации модуляторов для нитридной платформы, их преимущества и недостатки.

Основой сопроцессора являются волноводы из нитрида кремния, образующие сетку интерферометров Маха Цендера. Процесс изготовления фотонной схемы из нитрида кремния состоит из следующих этапов: окисление кремниевой пластины, нанесение нитрида кремния, литография для формирования схемы, травление нитрида кремния и нанесение верхней оболочки. Для формирования схемы мы оптимизировали маршрут на основе наименьших ошибок сшивания (максимальная ошибка менее 10 нм), разрешения изготовления для критических размеров топологических элементов (минимальный размер до 50 нм), наименьшей измеренной шероховатости края линии волновода (среднеквадратичное значение менее 0,5 нм) и наименьшего потери при распространении (0,5 дБ/см для широкой полосы частот 900–1550 нм) [2].

Мы также представляем два альтернативных метода электрооптической модуляции сигнала. Первый основан на активном элементе из ниобата лития. Возможно гетерогенная интеграция, предполагающая формирование волноводов из нитрида кремния на подложке ниобат лития на изоляторе (LNOI) [3] или гибридная

интеграция пластин [4]. Альтернативный метод электрооптической модуляции основывается на многослойного пленочного стека с ИТО [5]. Он может быть использован для устройств, работающих в гигагерцовом диапазоне и более высокой степени интеграции.

Литература

1. Mehonic Adnan et al. Roadmap to Neuromorphic Computing with Emerging Technologies // arXiv preprint arXiv:2407.02353 (2024).
2. Buzaverov K. A. et al. Low-loss silicon nitride photonic ICs for near-infrared wavelength bandwidth // Optics Express 31.10 (2023): 16227–16242.
3. Qi Yifan et al. High-speed integrated lithium niobate low-index rib loaded waveguide modulator without direct lithium niobate etching // arXiv preprint arXiv:2308.03073 (2023).
4. Churaev M. et al. A heterogeneously integrated lithium niobate-on-silicon nitride photonic platform // Nature communications, 2023. 14.1: 3499.
5. Lotkov E. S. et al. Silicon on-chip Electro-optic Modulation With Ito Film Stacks, 2021.

УДК 621.382, 621.383

Разработка узла ввода-вывода излучения для приборов интегральной фотоники на основе InP гетероструктур

д. ф.-м. н. Васильевский И. С., Бурдыкин М. С., к. т. н. Рыжук Р. В., к. ф.-м. н. Виниченко А. Н., Тертышная Ю. А., к. ф.-м. н. Гришаков К. С., Касьянов В. С., д. т. н. Каргин Н. И., д. ф.-м. н. Стриханов М. Н.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
ivasilevskii@mail.ru*

Представлены расчетные и экспериментальные результаты разработки конструктивных и технологических элементов планарного узла ввода-вывода оптического излучения для создания приборов интегральной фотоники на основе гетероструктур на подложках InP для С оптического диапазона. Решена комплексная задача моделирования гетероструктур для построения активно-пассивных двухъярусных волноводов для обеспечения потерь на ввод не более 2 дБ/узел. Разработаны технологии высокоаспектного плазмохимического травления для формирования прецизионных структур. Результаты могут быть использованы в качестве элементов базового технологического процесса для фотонных интегральных схем на основе InP технологической платформы.

Ключевые слова: интегральная фотоника; гетероструктуры; InP; планарная технология; конструкция; оптический ввод; фотонная интегральная схема.

Для информационно-телекоммуникационной техники, построения сетей 6G и других задач, требующих обработки широкополосных СВЧ сигналов с шириной несколько десятков ГГц, применяются подходы микроволновой фотоники (радиофотоники). Одной из актуальных задач радиофотоники является разработка технологий монолитных интегральных фотонных схем (ФИС) с активными и пассивными элементами, причем одной из наиболее универсальных технологических платформ являются гетероструктурные материалы InAlGaAsP на подложке InP. При создании InP ФИС одной из значимых конструктивно-технологических задач является создание высокоэффективного ввода-вывода оптического излучения в планарный волновод с торца кристалла, представляющая значительную как расчетную, так и технологическую сложность. Промышленный серийный выпуск ФИС на InP пока не освоен в мире, и проблема адиабатического узла ввода-вывода решается по-разному в ряде работ [1–2] с достижением минимальных потерь на уровне 3–6 дБ. С точки зрения технологичности наиболее устойчивым является формирование узла ввода-вывода без эпитаксиального дорастивания дополнительных слоев, путем травления слоев исходной гетероструктуры. Однако, для этого приходится переходить к составной гетероструктуре, содержащей два уровня волноведения по высоте структуры, причем переход от одного к другому достигается изменением латеральных контуров тейперированных узлов.

Для комплексного моделирования конструкции гетероструктур и топологии узлов ввода-вывода и конструктивных элементов фотонных интегральных схем на InP-техплатформе решались несколько задач. Выполнены аналитические оценки материальных параметров в диапазоне длин волн 1520–1565 мкм для слоев



In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}, InAlGaAs и InGaAs слоев, кристаллические решетки которых согласованы с InP.

Рассчитаны условия волноведения с сохранением модового состава в нижнем наборном волноводе, образованном слоями-вставками InGaAsP, разделенными спейсерами InP, а также в верхнем активном волноводе, содержащем ядро InGaAsP/MQW/InGaAsP, где MQW- квантово-размерная сверхрешетка InAlGaAs/InAlAs, используемая, в частности, для построения электрорефрактивного модулятора Маха — Цендера [3].

Путем моделирования оптимизирована конструкция узла ввода-вывода — линейные размеры в плоскости как для нижнего, так и для верхнего волноводов, условия перетекания оптической мощности. Показано, что достаточно высокие коэффициенты передачи могут быть достигнуты для небольшого спектрального диапазона путем создания «резонансной области» взаимодействующих волноводов. Напротив, обеспечение требования высокой эффективности передачи в достаточно широком диапазоне $1,55 \pm 0,05$ мкм приводят к необходимости снизить в целом коэффициент передачи до уровня потерь около 1,6–1,7 дБ. Для определения оптических потерь на распространение и на ввод излучения разработан массив волноводов с различной оптической длиной. Фото изготовленного тестовой ФИС приведено на рис. 1.

Выполнена разработка элементов технологии формирования узлов с помощью прецизионной электронной литографии с обеспечением безразрывной стыковки полей экспонирования для обеспечения высокой точности топологии. Формирование гребней волноводов с использованием жесткой маски SiN_x проведено в плазме Cl₂/Ar. Пример травления мелкозаглубленного гребневого волновода InP/InAlGaAs/InAlAs/ InGaAsP приведен на рис. 2.

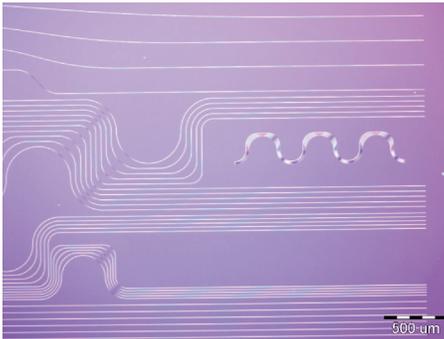


Рис. 1. Микрофотография тестовой фотонной интегральной схемы на основе InP с набором волноводов для определения оптических потерь на распространение и на ввод излучения

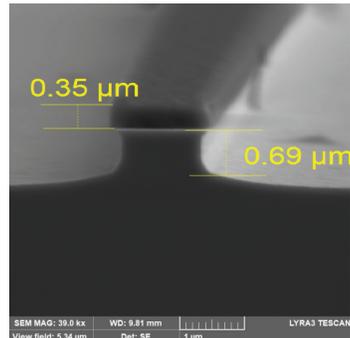


Рис. 2. Результат травления мелкозаглубленного активного волновода InP/InAlGaAs/InAlAs/ InGaAsP через жесткую маску SiN_x в плазме Cl₂/Ar

Одной из проблем технологии является шероховатость края структуры гребня и неоднородность плоскости травления. Для решения проблемы использована

особая конструкция стола установки плазмохимического ICP RIE травления с подогревом для предотвращения накопления InCl-продуктов.

Достиженные результаты будут использованы для создания макетных образцов ФИС с улучшенным вводом-выводом излучения. Дальнейшими шагами развития подходов должны стать разработка интегрального волноводного СВЧ фотодетектора на основе InP, ряда пассивных элементов, построение базового технологического процесса для изготовления интегральных активных и пассивных элементов в едином цикле и построение моделей элементов для использования в САПР. Такой подход позволит создать унифицированный базовый технологический процесс с библиотекой элементов, который можно будет использовать для создания достаточно широкой номенклатуры фотонных интегральных схем.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра радиофоники и СВЧ технологий НИЯУ МИФИ в рамках проекта РНФ № 23-91-06309.

Литература

1. Klein H. Integrated InP Mach-Zehnder Modulators for 100 Gbit/s Ethernet Applications using QPSK Modulation. Technische Universität Berlin, 2010.
2. Ueda Y. et al. // Electronics Letters, 2017. Vol. 53 (12). P. 797.
3. Васильевский И. С., Аврамчук А. А., Бурдыкин М. С., Захарченко Р. В., Виниченко А. Н., Горелов А. А., Давлятшина А. Р., Тертышная Ю. А., Сибирмовский Ю. Д., Гришаков К. С., Каргин Н. И., Стриханов М. Н. Проектирование и технология электрооптического модулятора Маха—Цендера на основе InP с шириной полосы 40 ГГц // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. Отв. за выпуск Сиберт С. Д. Омск, 2022. — С. 67–75.



УДК 621.3.049

Инновационный спектрометр на чипе

Яньков В. В., Ивонин И. А., Певчих К. Э., Любичкая А. В.

ООО «ФОТИСС»

125167, г. Москва, ул. Викторенко, 16, стр. 1, пом. 4/2

vladimiryanikov@yahoo.com, igoivo@yandex.ru, k.pevchikh@yandex.ru,

albina.lyubitskaya@gmail.com

Интегральный микроспектрометр на чипе, основанный на цифровых планарных голограммах, является прорывом в области сенсорных систем. Устройство позволяет решить проблемы хрупкости, чувствительности к окружающей среде и высокой стоимости существующих приборов, обеспечивая компактность (размер чипа 2×2 см) и разрешающую способность от 0,18 нм до 0,05 нм.

Ключевые слова: интегральный микроспектрометр; фотонные интегральные схемы; ФИС; численные планарные голограммы; интеррогатор.

Интеррогатор — это устройство, предназначенное для сбора, анализа и преобразования оптических параметров, полученных с помощью волоконно-оптических датчиков, в физические величины. Устройство позволяет осуществлять мониторинг различных структур в режиме реального времени, что делает его необходимым в различных отраслях промышленности. Однако существующие на рынке приборы по-прежнему отличаются хрупкостью, чувствительностью к температурным и механическим воздействиям, а также высокой стоимостью и громоздкостью. Уменьшение размеров неизменно приводит к значительному снижению спектрального разрешения, тем самым снижая точность измерений физических величин.

В последние годы интеррогаторы, основанные на фотонных интегральных схемах (ФИС), завоевали популярность благодаря более высокой производительности по сравнению с устройствами, использующими дискретные компоненты. Интеррогаторы на ФИС отличаются более компактным дизайном, улучшенными механической устойчивостью и термической стабильностью, а также снижением энергопотребления и затрат. Ключевым элементом интеррогатора на ФИС может являться интегральный микроспектрометр. Интегральный микроспектрометр на основе AWG-решеток позволяет распределить спектр сигнала с точностью до 0,6 нм. Такой точности все еще недостаточно, поскольку изменение напряжения или температуры (например, на 1 °C) могут соответствовать изменению длины волны на 0,1 нм.

Мы предлагаем новое решение — компактный и надежный интеррогатор в виде USB-модуля со встроенным микроспектрометром на основе численных планарных голограмм. Это универсальное устройство совместимо с различными типами датчиков и легко подключается как к специализированному оборудованию, так и к стандартному ПК. Оно оптимизировано и имеет небольшой вес — всего 50 грамм, размеры чипа составляют 2×2 см. Несмотря на малые габариты, мы добились оптического разрешения в 0,18 нм, превзойдя ожидания рынка (0,6 нм). Мы стремимся к дальнейшему повышению разрешения до 0,05 нм, что позволит микроспектрометру детектировать изменения измеряемых величин без использования электроники. Пост-обработка сигнала позволяет улучшить разрешающую способность в 10 раз. Конструкция нашего микроспектрометра позволяет настраивать его

в различных спектральных диапазонах, а интеграция на одном оптическом чипе значительно снижает производственные затраты.

Литература

1. Calafiore G., Koshelev A., Dhuey S., Goltsov A., Sasorov P., Babin S., Yankov V., Cabrini S., Peroz C. Holographic planar lightwave circuit for on-chip spectroscopy // *Light, Science & Applications*, 2014. 3 (9), e203–e203. URL: <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.84>.
2. Li Z., Zhang X., Qiu C., Xu Y., Zhou Z., Wei Z., Qiao Y., Chen Y., Wang Y., Liang L., Lei Y., Song Y., Jia P., Zeng Y., Qin L., Ning Y., Wang L. Adjoint algorithm design of selective mode reflecting metastructure for BAL applications // *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), 2024. 14 (9). P. 787. URL: <https://doi.org/10.3390/nano14090787>.
3. Yankov V., Babin S., Ivonin I., Goltsov A., Morozov A., Polonskiy L., Spector M., Tatalapov A., Kley E.-B., Schmidt H. Multiwavelength Bragg gratings and their application to optical MUX/DEMUX devices // *IEEE Photonics Technology Letters: A Publication of the IEEE Laser and Electro-Optics Society*, 2003. 15 (3). P. 410–412. URL: <https://doi.org/10.1109/lpt.2002.807915>.
4. Yankov V. Optical integrated nanospectrometer US Patent (№7889336), 2011.



УДК 519.6

Разработка программного обеспечения для схемотехнического проектирования фотонных интегральных схем и устройств оптоэлектроники

к. ф.-м. н. Киселёв Ф. Д.^{1,2}, Беляков В. И.^{1,2}, Тупяков Д. В.^{1,2}, к. ф.-м. н. Егоров В. И.^{1,2} к. ф.-м. н., Самсонов Э. О.^{1,2}

¹ ООО «КвантКАД»

197350, г. Санкт-Петербург, Шуваловский пр., 41, корп. 1, лит. А, кв. 592

² Национальный исследовательский университет ИТМО

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А

Разработан прототип программного обеспечения для схемотехнического проектирования фотонных интегральных схем (ФИС) и устройств оптоэлектроники (ОЭ). Прототип позволят производить расчет функциональных характеристик устройств на основе ФИС и элементов волоконной оптики. Пользователь собирает соответствующую схему в графическом интерфейсе пользователя (ГИП), вводит параметры ее элементов, а также глобальные параметры расчета, после чего программы производит необходимые вычисления и выводит результаты на выбранные пользователем визуализаторы. В программном обеспечении реализованы однонаправленный и двунаправленный решатели в частотной и временной областях для работы с одномерными оптическими и электрическими сигналами.

Ключевые слова: средство автоматизированного проектирования; компьютерное моделирование; фотонные интегральные схемы; оптические системы связи.

Программное обеспечение (ПО) в области фотоники активно используется для проектирования устройств на разных уровнях, начиная с уровня элементов, где происходит физический расчет распространения электромагнитных волн в 2D и 3D структурах, и заканчивая проектированием топологии оптических чипов, сделанных по технологии фотонных интегральных схем (ФИС). Между данными этапами проектирования, по аналогии с маршрутом проектирования микроэлектроники, лежит этап схемотехнического проектирования. В рамках данного этапа пользователь собирает оптоэлектронную схему своего устройства из набора компактных моделей и рассчитывает его функциональные характеристики. Данный этап является ключевым для проектирования как ФИС, так и систем ОЭ, реализованных на основе волоконной оптики.

Зарубежные компании, предоставлявшие такое ПО ушли с рынка Российской Федерации. В рамках данной работы был разработан прототип отечественного аналога такого ПО, который реализует однонаправленный и двунаправленный решатели в частотной и временной областях. ПО предоставляет графический интерфейс пользователя, с помощью которого пользователь может собрать схему проектируемого устройства, произвести расчет и вывести результаты. Схема составляется из математической библиотеки оптических и электрических элементов. Каждый элемент библиотеки представляет собой математическую модель, совершающую определенное преобразование оптических и/или электрических сигналов.

В качестве примеров работы ПО представлены результаты расчета системы квантовой коммуникации на боковых частотах, а также микрокольцевого резонатора и интерферометра Маха—Ценднера в фотонном интегральном исполнении. Полученные результаты совпали с расчетами, выполненными с помощью зарубежных аналогов.



УДК 538.915

Структурные и оптические свойства сверхрешеток 2 типа InAs/GaSb

Ерошенко Г. Н.¹, Кривобок В. С.^{1,2}, Пашкеев Д. А.¹, Клековкин А. В.¹,
Минаев И. И.¹, Савин К. А.¹, Муратов А. В.¹, Гончаров А. Е.², Николаев С. Н.¹

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

er-grig@mail.ru

² АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

Методом молекулярно-лучевой эпитаксией получены короткопериодные сверхрешетки InAs/GaSb содержащие до 300 периодов. Структурные и оптические свойства полученных сверхрешеток указывают на их пригодность для создания фотоприемных устройств среднего и дальнего ИК-диапазонов.

Короткопериодные сверхрешетки InAs/GaSb одни из перспективных видов структур для ИК детекторов среднего и дальнего диапазона. К основным преимуществам можно отнести подавление Оже-рекомбинации [1, 2] и межзонного туннелирования за счет высокой подвижности и большой эффективной массы электронов [3], а также отсутствие ограничений, связанных с правилами отбора для оптических переходов [4]. Ощутимая разница постоянных решеток (0,6 %) между InAs и GaSb приводит к увеличению упругого напряжения между слоями, что сопровождается образованием дефектов и как следствие ухудшению оптических характеристик. На сегодняшний день одним из способов компенсации напряжения является внедрение переходных слоев In(As)Sb. В настоящей работе были проведены эксперименты по выращиванию T2SL с переходными слоями. Толщина слоев InAs и GaSb составили 4,62 и 2,79 нм соответственно.

In situ контроль роста осуществлялся с помощью дифракции быстрых электронов. Характеризация структур была проведена с помощью рентгеновской дифрактометрии, атомно-силовой микроскопии и просвечивающей микроскопии. Значение средней квадратичной шероховатости SR , содержащей 300 периодов, составила менее 2,6 нм. Рентгеновская дифрактометрия показала высокое структурное совершенство полученных образцов, отсутствие пластической релаксации и отсутствие изменения состава. Результаты просвечивающей микроскопии подтвердили номинально заложенные толщины слоев. Наблюдалась отчетливая граница переходных слоев, толщина которых составляла 1–2 МС.

Оптические характеристики отражения и пропускания были получены с помощью ИК-Фурье спектроскопии в широком диапазоне, при температуре 77 и 300 К. Так, для SR InAs/GaSb состоявшей из 100 периодов было установлено спектральное положение, по крайней мере, пяти основных переходов с участием электронных и дырочных минизон сверхрешетки и определено их положение по отношению ко дну зоны проводимости объемного InAs. Для отождествления минизон использованы расчеты в рамках метода огибающей волновой функции. Сопоставление полученных спектроскопических данных и расчетов позволяет утверждать, что край фундаментального поглощения сверхрешетки расположен в районе

0,12 эВ, формируется нижней минизоной электронов и верхней минизоной тяжелых дырок. Сравнительно малая спектральная ширина минизоны тяжелых указывает на то, что основную роль при формировании фотоотклика сверхрешетки играют электроны. С увеличением температуры от 77 до 300 К край поглощения сверхрешетки смещается слабо, в то время как переходы с участием высоколежащих минизон претерпевают заметный длиноволновый сдвиг.

Таким образом, методом молекулярно-пучковой получены образцы гетероструктур с короткопериодными сверхрешетками, в которых реализована компенсация упругих напряжений. Показано, что используемый подход позволяет получать сверхрешетки с параметрами приемлемыми для создания фотоприемных устройств, работающих в дальнем ИК-диапазоне.

Литература

1. Grein С. Н., Cruz Н., Flatte М. Е., Ehrenreich Н. Theoretical performance of very long wavelength InAs/In_xGa_{1-x}Sb superlattice based infrared detectors // Applied Physics Letters, 1994. Vol. 65. № 20. P. 2530–2532.
2. Rogalski А., Antoszewski J., Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays // Journal of applied physics, 2009. Vol. 105. № 9. P. 4.
3. Rogalski А. Recent progress in infrared detector technologies // Infrared Physics & Technology, 2011. Vol. 54. № 3. P. 136–154.
4. Литвинов Д. А. и др. Исследование одноэлектронного спектра GaAs/AlGaAs-гетероструктуры для фотодетекторов среднего ик диапазона с помощью измерений низкотемпературной люминесценции // Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, 2020. — Т. 47. — № 4. — С. 9–16.



УДК 621.3

Высокоскоростное устройство измерения дальности

Беляев К. С., Гук А. С., Тышкунов Н. В.

ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева»

143402, г. Красногорск, ул. Речная, 8

Одной из важнейших задач авиационной и наземной прицельной техники в части оптико-электронных комплексов является определение дальности до объекта. На практике большинство оптико-электронных комплексов оснащены телевизионным, тепловизионным и дальномерными каналами. К соосности оптико-электронных каналов накладываются жесткие требования, обычно соосность каналов не должна быть более 10 угловых секунд во всех диапазонах внешних воздействующих факторов, в том числе большого рабочего температурного диапазона от -50 до $+50$ °С. Для компенсации температурного дрейфа конструкции оптико-электронного устройства используют активные системы выверки, которые устанавливаются непосредственно на носителе и позволяют с нужной точностью скорректировать метку прицеливания для каждого из каналов. Другим вариантом компенсации температурного дрейфа (при условии повторения поведения конструкции) являются программные коэффициенты смещения метки прицеливания для каждого из каналов подобранные по температуре, и обеспечивающие требуемые точности.

Таблица 1. Технические характеристики лазерных целеуказателей-дальномеров

Технические характеристики	НТЕВ.461321.009-1 (2) ООО «Квантовая оптика»	ASELFLIR 300T Турция	ARGOS II HDT Германия	ЛЦД-50 АО НИИ «Полус»	ЛЦД-100 АО НИИ «Полус»
1. Рабочая длина волны, мкм	1,064	1,064	1,064/1,54	1,06	1,06
2. Мах дальность, м	При МДВ 20 км — 10000 м (20000 м)	20000 м	250—20000 м на 1,54 мкм		При МДВ 20 км — 20000 м
3. Энергия лазерного излучения, Дж	0,05 Дж При частоте до 30 Гц Расходимость 0,2 мрад Диаметр передающего объектива 20 мм, приемного 30 мм (50 мм)	0,08 Дж При расходимости 0,35 мрад	>0,04 Дж При расходимости 0,4 мрад При частоте 8—20 Гц	>0,05 Дж При расходимости 0,4 мрад При частоте 0—20 Гц	>0,1 Дж При расходимости 0,2 мрад
4. Питание, В	24 В			24±3 В	24±3 В
5. Масса, кг	0,8 (1.3)			1	2
6. Тип накачки	Диодная			Диодная	Диодная

Однако точное сведение оптических осей лазерного дальномера и телевизионного, тепловизионного каналов не гарантируют правильного измерения дальности до объекта [1]. При оценке измерений дальномера необходимо в первую очередь ориентироваться на такой параметр, как расходимость лазерного излучения. В табл. 1 приведена сводная информация о характеристиках лазерных целеуказатель-дальномеров для авиационной техники [2, 3]:

Смоделируем измерение лазерным дальномером-целеуказателем на дистанции 5 км в приземных условиях цели в виде фигуры № 12, как показано на рис. 1. Цель (1) находится на дистанции 5000 метров, за целью (1) находится лес на расстоянии 5300 метров, перед целью находится на дальности 4200 метров молодые деревья и кусты (3), непосредственно перед целью на расстоянии 4900–4950 метров высокая трава (4). Сама цель находится на пригорке, который начинается от молодых деревьев (3).

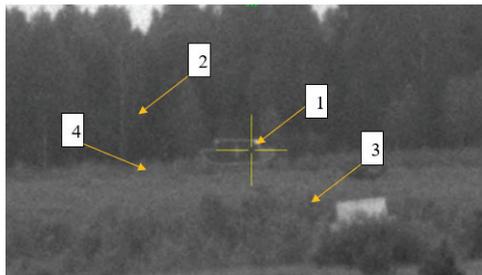


Рис. 1. Цель в виде фигуры № 12, где 1 — цель в виде фигуры № 12а, 2 — лес на заднем плане, 3 — молодые деревья и кусты, 4 — высокая трава

Допустим для измерения дальности до цели используется дальномер с энергией 50 мДж и расходимостью лазерного излучения 0,4 мрад. На дистанции 5 км линейный размер лазерного излучения 0,4 мрад составит 2 метра (данные расчеты ведутся без учета влияния атмосферы). Принимая во внимание, что сведение каналов в системах обеспечивается с точностью 10 угловых секунд, что на порядок меньше расходимости лазерного излучения и не может повлиять на точность измерения дальности. Температурный дрейф в крупногабаритных оптико-электронных системах прицеливания и обнаружения может достигать нескольких минут, что сравнимо с расходимостью 0,4–0,5 мрад лазерного излучения передающего канала лазерного дальномера. В таком случае может возникнуть ситуация, когда центр передающего канала лазерного дальномера может быть направлен выше цели или ниже, как показано на рис. 2.

В обычной ситуации наземной работы с лазерным дальномером для определения точной дальности до объекта должны произвестись около пяти замеров в районе цели. При условии температурного дрейфа число данных замеров вероятно возрастает. При этом следует учесть, что отраженный сигнал приходит от всех объектов, находящихся в конусе расходимости передающего канала лазерного дальномера и регистрируются все объекты внутри конуса, при условии достаточности отраженного сигнала. Основными вспомогательными инструментами для удобства



определения дальности является метод ограничения минимального порога измеряемой дальности (стробирование) и выбор цели по порядковому положению (первая, вторая, третья ..., последняя). Данные способы помогают оператору в определении истинной дальности до цели, но все равно это занимает значительное время — около 10 секунд.

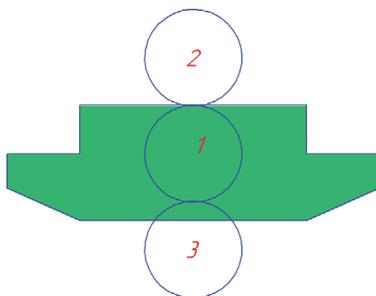


Рис. 2. Возможные положения лазерного излучения на цели передающего канала лазерного дальномера, при условии наведения на основного канала на центр цели

Для сокращения времени и оптимизации работы предлагается использовать дополнительную сканирующую систему в виде двухкоординатной акустооптической системы.

Принцип работы однокоординатной акустооптической системы показан на рис. 3 и двухкоординатной на рис. 4.

Однокоординатная акустооптическая система состоит из акустооптического дефлектора на кристалле парателлурит [4], драйвера и персонального компьютера. В акустооптическом дефлекторе создается бегущая звуковая волна, которая служит дифракционной решеткой для падающего лазерного излучения. При выполнении режима брэгговской дифракции [5] практически вся энергия падающего излучения переходит в один дифракционный порядок. Угловое положение этого порядка зависит от частоты ультразвуковой волны, а интенсивность зависит от мощности ультразвуковой волны. При оптимальных параметрах ультразвуковой волны, геометрии ячейки и юстировки удается добиться перекачки до 95% от падающего излучения во всем рабочем диапазоне однокоординатного акустооптического дефлектора [6]. Для двухкоординатного акустооптического дефлектора, где последовательно располагаются две ортогональные однокоординатные акустооптические дефлекторы как показано на рис. 4 можно добиться перекачки в управляемый порядок до 80% в рабочем угле сканирования [7].

При разработке системы сканирования на основе акустооптических систем, кроме описанных выше, нужно принимать ряд особенностей, таких как: ограниченный угол сканирования (обычно не более 3×3 угловых градуса), работа с поляризованным излучением, незначительный температурный дрейф (при постоянно работающем дефлекторе оценочные значения дрейфа составляют 50 угловых секунд за 1 час работы с момента включения дефлектора).

В связи с тем, что акустооптическая система позволяет производить сканирование с быстродействием 15 мкс на одно положение и формирование следующего

положения происходит без прохождения промежуточных положений, то сканирование можно осуществлять по любым алгоритмам рабочей зоне сканирования. Для реализации сканирования предлагается выделять зону перекрывающую возможные ошибки системы совмещения осей и наведения, например как показано на рис. 5.

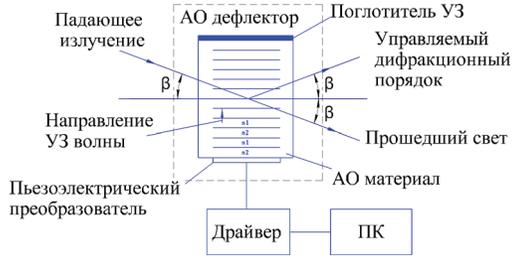


Рис. 3. Принцип работы однокоординатной акустооптической системы

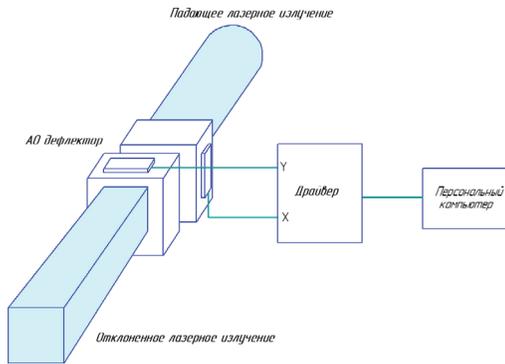


Рис. 4. Принцип работы двухкоординатной акустооптической системы



Рис. 5. Пример выделения цели



При оценке времени, которое потребуется для сканирования объекта размером 8 метров в длину и 2,5 метра в высоту потребуется 12 положений (с учетом плотного заполнения без пропусков) и, например, с учетом запаса сканирования в размер цели время сканирования составит 108 положений, как показано на рис. 6.

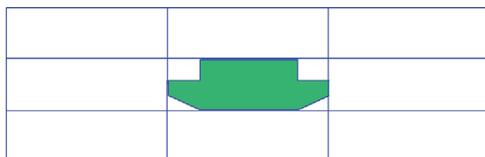


Рис. 6. Общее сканирование цели акустооптическим дефлектором

Данный метод позволит получить 108 точек с дальностью до объекта и тем самым построить объемную картину местности с значениями дальности. При этом будут учитываться только первые отраженные значения и использоваться стробирование для удобства

При этом современные дальномеры-целеуказатели не подходят для задачи сканирования, так как время на сканирование 108 положений при частоте 20 Гц займет более 5 секунд, что в условиях подвижной цели недопустимо. Для реализации сканирования требуется лазерный источник с частотой следования импульсов более 10 кГц с энергией в импульсе 5–10 мДж и расходимостью лазерного излучения 0,3–0,5 мрад, для задачи целеуказания потребуется дублирующий излучатель без системы сканирования с выходными параметрами согласно табл. 1.

Литература

1. Вильнер В., Волобуев В., Ларюшин А., Рябокуль А. Достоверность измерений импульсного лазерного дальномера // *Оптоэлектронные устройства, фотоника*, 2013. — № 3 (39). — С. 42–60.
2. URL: <https://quantumoptics.ru/products/1>.
3. URL: <https://niipolyus.ru>.
4. Кропотов Г. И., Роголин В. Е., Каплунов И. А., Шахмин А. А., Третьяков С. А., Гук А. С. Применение и оптические характеристики монокристаллического парателлуриата для акустооптики диапазонов 0,355–5 мкм и ТГц // *Оптика и спектроскопия*, 2024. — Т. 132. — Вып. 4. — С. 454–464.
5. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. *Физические основы акустооптики*. — М.: Радио и связь, 1985. — 280 с.
6. Антонов С. Н. Акустооптический дефлектор — новый метод повышения эффективности и широкополосности // *Журнал технической физики*, 2016. — Т. 86. — Вып. 10. — С. 155–158.
7. Гук А. С., Гуляев Ю. В., Евстигнеев В. Л., Казарян М. А., Мокрушин Ю. М., Талалаев М. А., Шакин О. В. Температурные эффекты в акустооптических дефлекторах на парателлуриате. — М.: РАН, 2017.

УДК 681.7.068, 528.526.6

Перспективные разработки микрооптических гироскопов**Кнышев С. Р.**

ООО «Лазерные компоненты»

117105, г. Москва, Варшавское ш., 9, стр. 1Б, офис 504

s.knyshev@lasercomponents.ru

Рассмотрены основные технологические подходы по созданию микрооптических чувствительных элементов на базе пассивных кольцевых резонаторов (ПКР) и различных типов микрооптических волноводов (т. н. «плоские волноводы», микроволоконные и фотоннокристаллические).

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп (ВОГ); микрооптический гироскоп (МОГ); микрооптикомеханическая система (МОЭМС).

На сегодняшний день оптические гироскопы, работа которых строится на основе эффекта Саньяка, занимают примерно 2/3 рынка навигационных приборов и по прогнозам аналитиков такое положение скорее всего сохранится в обозримом будущем не смотря на развитие иных, прежде всего твердотельных и микромеханических, технологий [1]. Это связано с тем, что кольцевые лазерные гироскопы на He-Ne лазерах (КЛГ) на ряду с волоконно-оптическими гироскопами (ВОГ) до сих обеспечивают наилучшие точностные показатели (прежде всего стабильность нулевого смещения) при автономной ориентации в пространстве динамических носителей. Однако, современные тенденции миниатюризации навигационных приборов требуют определенного технологического прорыва по созданию достаточно надежных и точных гироскопов с уменьшенными массогабаритными характеристиками и пониженным энергопотреблением. Одним из перспективных направлений тут может стать разработка ВОГ резонансного типа (РВОГ), которые должны при использовании волокна на несколько порядков меньшей длины достичь той же точности измерений, что и классические интерференционные ВОГ (ИВОГ) [2]. При этом стоит отметить, что большинство разрабатываемых на настоящий момент моделей РВОГ создаются на основе микрооптических схем. На рис. 1 представлена схема интегрированного оптического модуля МОГ на базе ПКР, излучателя в виде полупроводникового лазерного диода (ПЛД), однониткового микроволоконного контура с оптическим разветвителем светового сигнала и двух фотодетекторов на основе APD фотодиодов.

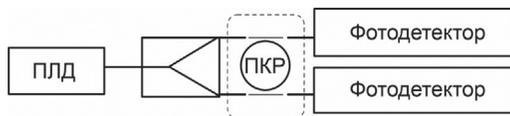


Рис. 1. Принципиальная схема интегрированного оптического модуля МОГ

Данная схема в ближайшем будущем может позволить создавать сверхминиатюрные МОГ, обладающие высокой чувствительностью и устойчивостью к перегрузкам. Работа резонаторного микрооптического гироскопа (РМОГ) построена на основе многооборотного кольцевого резонатора волноводного типа (WRR). Главной особенностью РМОГ является то, что предметом детектирования является



не фазовый, а частотный сдвиг, по которому определяется искомая величина инерциальной угловой скорости [3].

Другой конструктивный подход при создании МОГ представляет собой гибридную технологию (МОЭМС), сочетающую в себе микрооптический интерферометр и микромеханическую схему преобразования сигнала. Свет, исходящий из ПЛД, разделяется на два потока, которые проходят по коническому волокну, соединенному с ПКР в виде микродиска. Таким образом, резонансные лучи проходят вокруг диска в двух встречных направлениях и поступают в фотодетекторы и их фазовое расхождение анализируется блоком обработки сигнала для получения значения угловой скорости [4].

Инерциальные измерительные модули (ИМУ), построенные на таких прототипах МОГ, по своим массогабаритным характеристикам вполне сопоставимы с навигационными системами на микроэлектромеханических (МЭМС) компонентах, но вместе с тем имеют более высокую точность и в гораздо меньшей степени подвержены воздействию температуры и вибрации, хотя и требуют больших затрат на изготовление [5].

Литература

1. Gyroscope Market Size, Share, Demand, Global Analysis, 2032. | MRFR (marketresearchfuture.com).
2. Венедиктов В. Ю., Филатов Ю. В., Шалымов Е. В. Современное состояние оптических резонаторных гироскопов // Гироскопия и навигация, 2023. — Т. 31. — № 1 (120). — С. 45–57.
3. Kun Qian, Jun Tang, Hao Guo, Wenyao Liu, Jun Liu, Chenyang Xue, Yongqiu Zheng, Chengfei Zhang. Under-Coupling Whispering Gallery Mode Resonator Applied to Resonant Micro-Optic Gyroscope // Sensors, 2017. 17, 100.
4. Dunzhu Xia, Lingchao Huang, Liye Zhao. A New Design of an MOEMS Gyroscope Based on a WGM Microdisk Resonator. // Sensors, 2019. 19, 2798.
5. ANELLO Photonics, the Creator of the SiPhOG™, Announces Availability of New Embedded Centimeter-Accurate Localization Services for Its Product Line Built for Autonomous Applications in GNSS-Denied Environments (prnewswire.com).

УДК 621.3.049

Беспроводная хроническая стимуляция периферических нервов с помощью органического оптоэлектронного имплантата**Марков А. Г.¹, Юсуповская Е. А.¹, Коновалов А. Н.^{1,2}, Пьявченко Г. А.¹, Тельшев Д. В.^{1,3}**¹ *Институт бионических технологий и инжиниринга, Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)**119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8
markov_a_g@staff.sechenov.ru*² *Нейрохирургический центр им. Бурденко
125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16*³ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Институт биомедицинских систем
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

Разработаны устройства на основе органических полупроводниковых структур на манжете из полиимида для острой и хронической стимуляции периферических нервов. Проведены острый и хронический эксперименты на крысах для демонстрации эффективности технологии беспроводной нейростимуляции.

Ключевые слова: биоэлектроника; органические полупроводники; беспроводная стимуляция; имплантируемое устройство; нейростимуляция.

На сегодняшний день имплантируемые клинические нейроэлектронные устройства ограничены отсутствием надежных, безопасных и минимально инвазивных методов беспроводной модуляции нервной ткани. В данной работе мы решаем эту проблему, используя органические полупроводниковые структуры на манжете из полиимида для острой стимуляции периферических нервов путем преобразования проникающего в ткани глубокого красного света в электрические сигналы. Результаты работы подтверждают, что стимулирующие полупроводниковые устройства представляют собой высокопроизводительный и биосовместимый подход к беспроводной нейромодуляции с потенциальной возможностью применения в различных областях клинической биоэлектроники.

В данной работе мы показали, что имплантируемые устройства на основе органических полупроводниковых структур [1, 2] способны к эффективной острой и хронической электрической стимуляции путем прямого преобразования световых импульсов в двухфазные электрические сигналы, сбалансированные по заряду, что считается благоприятным для безопасной длительной стимуляции. Кроме того, генерируемый заряд и, следовательно, вызываемый нейронный ответ напрямую зависят от силы и длительности светового импульса. Эти особенности позволяют точно контролировать темп и амплитуду стимуляции.

Для обеспечения беспроводной нейростимуляции мы используем органические полупроводниковые гетеропереходы из фталоцианина (H_2Pc , p -тип) и N,N' -диметил перилентетракарбоксил бисимида / (PTCDI, n -тип). Полупроводники



последовательно осаждается методом термического вакуумного испарения, образуя плотную пленку нанокристаллов. Такая комбинация *p-n*-переходов отличается высокой надежностью и стабильностью в водных средах. Чтобы создать имплантируемое устройство, способное эффективно подавать ток стимуляции, мы интегрировали его в лентообразную структуру, которая может облегать нерв. В качестве материала подложки мы использовали тонкий (20 мкм) полиимид, хорошо зарекомендовавший себя биосовместимый полимер. В архитектуре нашего устройства, мы использовали в качестве «верхнего» электрода периферический нерв, в качестве «нижнего» электрода мы использовали тонкий термически испаренный слой золота (толщина 10 нм), благодаря его отличной проводимости, хорошей прозрачности и механической гибкости. *P-n*-переход при освещении красным светом ($\lambda = 625$ нм) создает двойной электролитический слой, поскольку электроны накапливаются на границе раздела *n*-типа материала и электролита. В то же время дырки переходят в нижележащий металлический проводник, создавая противоположно заряженный двойной слой вокруг *p-n*-перехода, что приводит к возникновению ионных токов вокруг устройства. С точки зрения лежащего в основе нерва, такая архитектура устройства создает триполярное расположение стимулирующих электродов.

Устройства, интегрированные в ленту из полиимида, способные генерировать фотонапряжение до 320 мВ при облучении красным светом (625 нм, 6 мВт/мм²) обматывали вокруг седалищного нерва крысы с пикселем непосредственно рядом с эпиневрием. Лента фиксировалась вокруг нерва за счет своей формы самофиксирующейся манжеты. Длина манжеты составляла 14 мм, диаметр стимулирующего пикселя 3 мм.

После имплантации область освещались с помощью светодиода, который располагался над обнаженным нервом. Освещение устройства (длина импульса 25 мс, мощность 0,6 мВт/мм²) стимулировало седалищный нерв, о чем свидетельствовали визуально наблюдаемые подергивания в седалищно-иннервированных мышцах и зарегистрированные ЭМГ сигналы. При проведении хронического эксперимента в течение 100 дней, было установлено, что рассеченные седалищные нервы, подвергшиеся ежедневной хронической стимуляции с частотой 33 Гц в течение минуты, полностью восстанавливают свою проводимость, в отличие от, например, хирургически сшитых нервов. Эти результаты демонстрируют способность устройства преобразовывать световые импульсы в электрические потенциалы, способные стимулировать седалищный нерв.

Литература

1. Markov A., Gerasimenko A., Boromangnaeva A.-K., Shashova S., Iusupovskaia E., Kurilova U., Nikitina V., Suetina I., Mezentseva M., Savelyev M. et al. Multilayered organic semiconductors for high performance optoelectronic stimulation of cells // *Nano Res.*, 2023. Vol. 16. P. 5809–5816.
2. Markov A. G., Gerasimenko A. Y., Selishchev S. V. et al. Wireless Optoelectronic Neurostimulation of the Retina Using a Multilayer Organic Semiconductor Device // *Biomed. Eng.*, 2023. Vol. 57. P. 81–84.

УДК 621.3.049

Оптимизация и расчет молекул для органической электроникиДроздов Ф. В.^{1,2}¹ Центр НТИ МГТУ им. Баумана
105005, г. Москва, ул 2-я Бауманская, 5, стр. 1
drozdov@bmstu.ru² ИСПМ РАН им Н. С. Ениколопова
117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 70

Рассмотрены способы оптимизации и расчета молекул, применяемых для различных устройств органической электроники и фотоники. Показано как рациональный дизайн органических соединений может быть использован для создания более эффективных устройств.

Ключевые слова: органическая электроника; фотоника; квантово-механический расчет.

Для создания эффективных устройств на основе органической электроники крайне важно учитывать различные факторы, влияющие на важнейшие характеристики конечного устройства. К таким факторам относятся: подвижность носителей зарядов, положение уровней ВЗМО и НСМО, ширина запрещенной зоны, спектр поглощения и испускания, диэлектрическая проницаемость, показатель преломления и многое другое. Известно, что органические молекулы в отличие от неорганических полупроводников можно более «тонко настраивать» по своим свойствам. Так, часто можно изменять структуру органической молекулы с тем расчетом, чтобы оптимизировать ее геометрию, изменять ширину запрещенной зоны, подвижность носителей зарядов и т.д. Часто такой вид оптимизации можно рассчитать квантово-механическими методами функционала плотности (DFT) и оптимизацией геометрии молекул. Однако, имеются многочисленные эмпирические примеры как незначительные изменения геометрии молекулы приводят к драматическому изменению свойств органического материала. В данной работе будут представлены примеры оптимизации органических материалов для использования в устройствах органической электроники.

Литература

1. Drozdov F. V. et al. // *Macromol. Chem. Phys.*, 2013, Vol. 214. 19. P. 2129–2249.
2. Min J., Luponosov Yu. N., Drozdov F. V. et al. // *J. Mater. Chem. A*, 2015. 3, 22695–22707.
3. Дроздов Ф. В., Пономаренко С. А. *Природа*, 2016. — № 4. — С. 3–14.
4. Drozdov F. V., Ponomarenko S. A. et al. // *Polym. Sci. B*, 2019. 61 (1). P. 56–76.

УДК 621.3.049.77:541.64

Разработка фоторезистов для фотолитографии с актиничным излучением 248 нм

д. х. н., Кузнецова Н. А.¹, к. х. н., Малков Г. В.², к. х. н., Курбатов В. Г.²,
Пугачева Т. А.², Малимоненко Н. В.¹, Варламов Д. А.³, д. х. н.,
Бадамшина Э. Р.²

¹ АО «НИОПИК»

123001, г. Москва, ул. Б. Садовая, 1, корп. 4

² Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1

gmalkov@icp.ac.ru

³ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Выполнен цикл работ по анализу литературных данных по позитивным фоторезистам для КгF-фотолитографии, синтезу полимерных основ, разработке составов ФР и сопоставлению их свойств с аналогами. Результаты апробации показали возможность применения разработанных ФР при изготовлении ИС.
Ключевые слова: фотолитография; фоторезист; полистиролы; полиакрилаты; сополимеры; состав.

При производстве интегральных схем (ИС) одним из наиболее важных является фотолитографический процесс формирования рельефных покрытий на функциональных поверхностях подложек с использованием фоторезистов (ФР). Фоторезист представляет собой светочувствительный технологический материал, который наносят на подложку в целях получения соответствующего фотошаблону расположения рельефа для обработки поверхности — для доступа травящих веществ, металлизации и других операций, необходимых при изготовлении полупроводниковых приборов и устройств. Композиции ФР для фотолитографии с актиничным излучением 248 нм в настоящее время в России не производятся.

Цель настоящей работы — анализ патентной и научной литературы по составам существующих фоторезистов, использующихся в фотолитографии с актиничным излучением 248 нм, по особенностям свойств отдельных компонентов и их функциональным признакам (ФР248), по методам получения и очистки полимеров, входящих в состав ФР248, а также разработка и апробация подходов к синтезу полимеров, наработка партии, пригодной для составления композиции ФР248, компоновка и проведение тестирования композиции на соответствующем технологическом оборудовании.

В ходе работы были определены требования к составу и свойствам композиции ФР248:

- растворитель или смесь растворителей (этиллактат и этил-3-этоксипропионат или метоксипропилацетат);
- полимерная основа, содержащая защищенные кислотные группы, а также имеющая высокую резистентность к плазмо-химическому травлению, хороший адгезионный контакт со слоем антиотражающего покрытия,

хорошую смачиваемость безметалльным проявителем (сополимеры гидроксистирила, стирола и акрилатов);

- общепринятым трендом является использование фоторезистов с химическим усилением, т. е. ФР248 должен содержать в своем составе фотогенераторы кислоты, образующие сильную кислоту под действием излучения, каждая молекула которой является катализатором каскада химических превращений, изменяющих растворимость полимерной пленки фоторезиста (сульфониевые и йодониевые соли перфторсульфокислот, имида перфторсульфокислот);
- для улучшения сохраняемости и выравнивания края элементов фоторезиста в композиции должно присутствовать основание («quencher»);
- необходимым компонентом, входящим в составы фоторезистов, является выравнивающий пленку ПАВ;
- кроме этого, композиция, в целом, должна характеризоваться высоким уровнем чистоты по микропримесям металлов и по содержанию взвешенных частиц, гомогенностью и термодинамической стабильностью раствора, доступностью исходных реагентов.

В ходе работы были экспериментально определены условия получения тройных сополимеров с оптимальной вязкостью, необходимой для формирования сплошных пленок определенной толщины, исследованы их свойства, наработаны и переданы образцы для составления композиции ФР248. Наряду с этим были проведены работы по разработке составов композиций фоторезистов, апробации композиций с подбором и оптимизацией режимов их нанесения, дозы и условий экспонирования. Результаты проведенного тестирования показали потенциальную возможность применения разработанных композиций при изготовлении интегральных микросхем.

Работа выполнена по тема № FFSG-2024-0017 Государственного задания (№ гос. регистрации 124020800013-7) и № FFSG-2022-0004 Государственного задания (№ гос. регистрации 122111700041-8) с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования ФИЦ ПХФ и МХ РАН.



УДК 621.3.049.77:541.64

Анализ состава и разработка антиотражающих покрытий с рабочей длиной волны 248 нм

к. х. н., Курбатов В. Г.¹, д. х. н., Кузнецова Н. А.², к. х. н., Малков Г. В.¹,
Пугачева Т. А.¹, Орган В. М.¹, Малимоненко Н. В.², Варламов Д. А.³, д. х. н.,
Бадамшина Э. Р.¹

¹ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1

kurbatovvg@list.ru

² АО «НИОПИК»

123001, г. Москва, ул. Б. Садовая, 1, корп. 4

³ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Проанализированы композиции для антиотражающих покрытий КгF-фотолитографии. Установлено строение и состав компонентов, входящих в композицию для антиотражающих покрытий. Разработана технология синтеза полимерной основы и хромофора. Получены композиции, которые испытаны в промышленных условиях.

Ключевые слова: антиотражающие покрытия; КгF-фотолитография; сополимеры; хромофорное соединение.

Без развития стабильной работы микроэлектронной области и ее развития сложно себе представить современный мир, т. к. такие изделия окружают нас со всех сторон. Бесперебойный выпуск изделий микроэлектронной отрасли обеспечивает технологический суверенитет страны. Отсутствие разработок материалов для микроэлектроники в нашей стране в последние 20–30 лет существенно осложнило развитие микроэлектронной области после введения санкционной политики в отношении Российской Федерации. Запрет на поставки материалов, в частности, для фотолитографии грозит остановкой производства даже самых простых микроэлектронных компонентов. Поэтому разработка отечественных материалов для микроэлектронной отрасли в настоящее время является актуальным и приоритетным направлением развития в Российской Федерации.

Цель настоящей работы — разработка технология синтеза полимерной основы и хромофорного компонента, обеспечивающего поглощение света с длиной волны 248 нм.

Полимерная основа в проанализированных образцах композиций для КгF литографии представляет собой сополимер ММА с малеиновым ангидридом (МА), этерифицированным метиловым спиртом. В качестве хромофорного соединения в данной композиции используется соединение на основе 9-антраценметанола и тетраангидрида карбоновой кислоты ароматического ряда. В качестве растворителей для этой композиции используется смесь метоксипропанола и метоксипропилацетата в различных соотношениях. Сшивающий агент представляет собой аминокформальдегидный олигомер. В качестве катализатора отверждения применяли катализаторы кислотного характера.

Согласно проведенному анализу промышленных образцов антиотражающих покрытий в качестве полимерной основы используется сополимер ММА и МА, частично этерифицированный метанолом. Были синтезированы сополимеры на основе ММА и МА. Соотношение мономеров ММА : МА варьировалось в диапазоне от 50 : 50 (мол. %) до 30 : 70 (мол. %). Показано влияние соотношения мономеров, а также растворителя, используемого для синтеза, на молекулярно-массовые характеристики синтезированных сополимеров. Состав всех сополимеров был охарактеризован с помощью ИК- и ЯМР-спектроскопии. Полученные сополимеры подвергались этерификации метиловым спиртом в присутствии кислотного катализатора. Показано влияние содержания катализатора и времени реакции на степени этерификации карбоксильных групп МА. в сополимере. Полученные после этерификации сополимеры были охарактеризованы с помощью гель-проникающей хроматографии, спектральных методов анализа и потенциометрического титрования.

В композиции с данным сополимеров необходимо введение соединения обеспечивающего поглощение пленки на длине волны 248 нм. В качестве данного соединения был использован продукт на основе 9-антраценметанола и ароматического тетракарбонowego ангидрида. Отработана технология синтеза данного соединения и определен его состав с помощью ИК- и ЯМР-спектроскопии.

Еще одним вариантом полимерной основы для антиотражающего покрытия является (мет)акриловый сополимер, содержащий хромофорную группу в основной цепи. Такой сополимер был получен путем сополимеризации ММА, 2-гидроксиэтилметакрилата, 9-антраценилметакрилата в среде различных растворителей для регулирования молекулярной массы и молекулярно-массового распределения. С помощью спектральных методов определен состав полученных сополимеров, а также изучены спектры поглощения. Методом гель-проникающей хроматографии оценены молекулярно-массовые характеристики синтезированных сополимеров.

Работа выполнена по теме № FFSG-2024-0017 Государственного задания с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

УДК 547.279.2

Производство материалов для отечественных фоторезистов с химическим усилением: фотогенераторы кислоты и метакрилаты каркасных алициклов

Заморецков Д. С.¹, Кузнецов И. Е.¹, Кузнецова Н. А.^{1,2}, Сидельцев М. Е.¹,
Новиков А. С.¹, Лолаева А. В.¹, Аккуратов А. В.¹

¹ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1
akkuratow@yandex.ru

² АО «НИОПИК»

123001, г. Москва, ул. Б. Садовая, 1, корп. 4

Проведена комплексная отработка синтеза наиболее востребованных фотогенераторов кислоты, таких как трифенилсульфоний трифлат, бис(трет-бутилфенил)йодоний трифлат и производных норборненкарбоксидимида в килограммовых количествах. Создан задел по синтезу алмамантсодержащих мономеров для полимерной основы фоторезистов 193 нм.

Ключевые слова: трифенилсульфониевые соли; дифенилйодониевые соли; алмамант; фоторезист; фотолитография.

Введение

Производство микроэлектроники методом литографии в глубоком ультрафиолете проводится с использованием большого количества разнообразных материалов [1]. Важное место среди них занимают фоторезисты (ФР) с химическим усилением. В составе современных ФР есть фотогенератор кислоты (ФГК) и полимер, зачастую включающий звенья на основе метакрилатных производных каркасных алициклов. Лабораторные методы получения большинства ФГК, а также сложных эфиров метакриловой кислоты основаны на сложных и трудномасштабируемых синтетических методах [2, 3], что ограничивает доступность ФР и делает его стоимость чрезвычайно высокой. В данной работе систематизированы исследования молодежной лаборатории ФИЦ ПХФ и МХ РАН по разработке простых подходов к получению ключевых компонентов для российских фоторезистов.

Реакторный синтез перспективных ФГК и метилметакрилатов на основе алмамантов и изоборнеола

В ходе работы систематически оптимизированы условия для получения трифенилсульфоний трифлата (РАГ 1), бис(трет-бутилфенил)йодоний трифлата (РАГ 2), нафторбутансульфоната норборненкарбоксидимида (РАГ 3), а также 2-метиламантан-2-ил метакрилата (рис. 1).

Преимущество предложенных подходов заключается не только в сокращении количества синтетических стадий, но и в использовании недорогих и доступных реагентов. К примеру, на финальной стадии ацилирования соединения **7** мы смогли исключить применение комбинации органического основания и катализатора (триэтиламин и *N,N*-диметиламинопиридин), и заменить их на водный раствор карбоната натрия. Синтез сульфониевых и йодониевых фотосолей предложено проводить по модернизированным схемам без низкостабильных магнийорганических

реактивов и йодаренов. Важнейшим результатом стало определение оптимальных условий для ацилирования стерически затрудненных адамантанолов. Детальное исследование более 18 различных систем позволило подобрать действенный метод воспроизводимого получения 2-метиладамантан-2-ил метакрилата. Данная методика была адаптирована для синтеза мономеров, содержащих изоборнильные, миртанильные и пиненовые каркасные фрагменты.

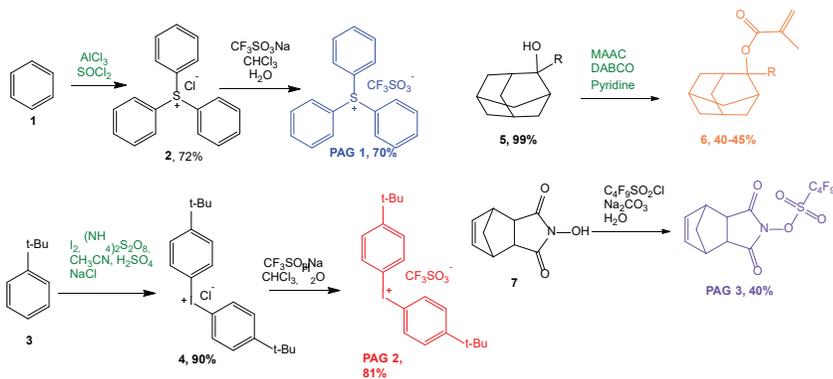


Рис. 1. Получение ФГК PAG 1-3 и 2-метиладамантан-2-ил метакрилата в оптимизированных условиях для реакторного синтеза

Заключение

Осуществлен успешный переход от лабораторного синтеза ФГК и мономеров на основе алициклов к их реакторному производству. В случае сульфониевых и йодониевых солей выход продуктов с одного цикла достигает до 1 кг. Ожидается, что дальнейшее масштабирование синтеза данных материалов в соответствии с разработанными методиками не вызовет трудностей, что, в свою очередь, сделает фоторезисты доступными для потребителя.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (122111700041-8).

Литература

- Quero J. M., Perdignes F., Aracil C. Microfabrication technologies used for creating smart devices for industrial applications// Smart Sensors and MEMS: Intelligent Devices and Microsystems for Industrial Applications (Sec.Ed.) Ed. by Nihtianov S. and Luque A, 2018. P. 291–311.
- Hossain Md. D, Ikegami Y. and Kitamura T. Reaction of Arenes with Iodine in the Presence of Potassium Peroxodisulfate in Trifluoroacetic Acid. Direct and Simple Synthesis of Diaryliodonium Triflates// J. Org. Chem., 2006. Vol. 71. P. 9903–9905.
- Патент CN 104628561 A, KHP. Resist Composition, Preparation method for 2-ethyl-2-adamantanol methacrylate/ Fr Zhiwei; заявитель и патентообладатель Shanghai Bokang Fine Chemical CO., LTD.; заявл. 11.11.2013; опубл. 20.05.2015.

УДК 621.3.049.77:541.64

Разработка электронных резистов на основе сополимеров метилметакрилата и метакриловой кислоты

Бороздина А. А.¹, Курбатов В. Г.², Малков Г. В.²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, г. Пермь, ул. Комсомольский просп., 29
gaff.alice@yandex.ru

² Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1

Проведен анализ зарубежного промышленно выпускаемого электронного резиста, определены состав композиции, свойства полимерной основы. Проведены синтезы полимерной основы резиста. Определено влияние разных растворителей, осадителей и концентрации инициатора на характеристики получаемого полимера.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография; электронный резист; материалы для микроэлектроники; сополимер метилметакрилата и метакриловой кислоты.

Актуальность использования электронно-лучевой литографии в современном мире обусловлена тем, что данный вид литографии зачастую используется для создания особо малых по размеру элементов с высоким разрешением, т. к. длина волны электронного пучка, используемого при экспонировании, настолько мала, что дифракция не определяет размеры рисунка. Электронно-лучевая литография широко применяется для создания фотомасок, а также является наиболее целесообразным методом для изготовления транзисторов, работающих на сверх-высоких частотах (СВЧ) [1].

Электронные резисты являются ключевым элементом в электронно-лучевой литографии, без которого перенос рисунка на поверхность материала будет невозможным. В настоящее время в нашей стране отсутствует их промышленное производство, а ввоз резистов из-за границы был приостановлен. Без разработки собственных резистов невозможно обеспечение стабильности и конкурентоспособности отечественного производства в области микроэлектроники.

В ходе данной работы был проведен анализ зарубежного промышленно выпускаемого позитивного электронно-лучевого резиста, который имеет полимерную основу, являющуюся сополимером метилметакрилата и метакриловой кислоты. Образец был проанализирован с помощью ИК-, ЯМР-спектроскопии, гель-проникающей хроматографии, в результате чего сделан вывод о составе резиста, молекулярной массе полимерной основы и степени ее полидисперсности. Были проведены синтезы полимерной основы резиста в растворах разных растворителей (ацетон, диоксан, МИБК, этиллактат) и определено их влияние на получаемый полимер. Установлено, что изменение растворителя, используемого при синтезе влияет на состав получаемого сополимера. Наряду с этим выявлено влияние полярности осадителя при выделении полимера из раствора на степень полидисперсности. Показано, что с ростом полярности осадителя наблюдается снижение

полидисперсности и выхода полимерной основы. Найдена зависимость между концентрацией инициатора и молекулярной массой полимерной основы.

Работа выполнена по теме Государственного задания № FFSG-2024-0017 с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

Литература

1. Савченко Л. А. Литография в технологии СВЧ транзисторов // Ученые записки Новгородского государственного университета, 2016. — № 3 (7).



УДК 621.3.049

Модель и моделирование эволюции шероховатости резиста вследствие неоднородности экспонирования и проявления

Зайцев С. И., Свинцов А. А.

*Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособленных материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
zaitsev@iptm.ru, bachokg@gmail.com*

Рассмотрена эволюция шероховатости поверхности резиста с учетом случайности положения точек входа электронов и случайности процессов рассеяния и поглощения энергии быстрых электронов в резисте. На основе нового алгоритма проявления резистов прослежена развитие шероховатости. Результаты сравниваются с другими моделями травления/роста случайных сред.

Ключевые слова: шероховатость; шероховатость края; электронно-лучевая литография; метод Монте-Карло; терия изотропного локального травления.

В микро-, нанoeлектронике и интегральной фотонике важно воспроизведение геометрических размеров для обеспечения правильной работы элементов. Важны при этом не только соблюдение средних размеров, но и уменьшение возможных случайных отклонений от заданной, идеальной формы. Для интегральной фотоники, например, важно понимание физических процессов, определяющих неровности, неоднородности нижних боковых и верхних поверхностей волноводов, формируемых выбранной литографией.

Мы рассматриваем и анализируем влияние естественных источников случайной неоднородности, сопровождающие экспонирование и проявление в электронно-лучевой литографии.

Это случайность процесса экспонирования и учет этих случайностей в моделировании процесса проявления. В данной работе мы рассматриваем относительно простой процесс эволюции шероховатости верхней поверхности резиста и не рассматриваем образования и развития шероховатости боковых краев.

В процессе экспонирования есть два главных источника случайности, это стохастический разброс в числе электронов, падающих на площадку заданного размера и случайность самой траектории в пространстве, сопровождаемая случайностью потерь энергии при столкновении электронов с атомами резиста и подложки. Еще один источник случайности флуктуации плотности резиста мы не рассматриваем, полагая, что эти флуктуации крайне незначительны.

Количество электронов выбиралось в соответствии с известной чувствительностью ПММА резиста (~ 100 мкК/см²), а пространственное положение точек входа в резист задавалось из предположения, что точки входа пространственно подчиняются распределению Пуассона, Далее следовало рассмотрение на основе метода Монте-Карло с суммированием по всем электронам, которое позволяло построить случайное поле потерь энергии в толще резиста.

Случайное поле поглощенной энергии переводимось в случайное поле скоростей растворения резиста с помощью так называемой дозовой зависимости, эта зависимость измеряется экспериментально и связывает плотность поглощенной энергии со скоростью растворения резиста, Одной из характеристик «дозовой

зависимости» является контраст резиста, который был выбран равным 3.5 в соответствии с экспериментальным значением. Поверхность резиста получалась численным решением задачи проявления в модели изотропного, локального проявления. В докладе будет представлен новый алгоритм решения этой задачи проявления

Было установлено, что средняя скорость проявления примерно постоянна по глубине резиста в соответствии с приближенным постоянством поглощенной энергии по глубине. Однако средне-квадратичное отклонение S от идеально плоской поверхности нарастало с глубиной по примерному закону

$$S \sim h^{3.5}$$

показатель степени примерно соответствует контрастности резиста

Мы провели сравнение полученных результатов с известной моделью Tracy-Widom, возникающие расхождения объясняются различием в характеристиках начального распределения скоростей травления и сильно нелинейной связи, задаваемой контрастом резиста

УДК 53.083.98

Методы определения основных характеристик резистов для электронно-лучевой литографии

Князев М. А., Иржак Д. В.

*Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособленных материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
maleksak@iptm.ru*

Предложены методы определения контрастности, чувствительности и толщины пленки резистов для электронно-лучевой литографии. С помощью этих методов получены характеристики новых отечественных резистов для электронно-лучевой литографии на основе ПММА.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография; полиметилметакрилат; рентгеновская рефлектометрия; тонкие пленки.

Структуры, получаемые с помощью электронно-лучевой литографии и процессы с их использованием, находят применение при производстве изделий микроэлектронной отрасли, в частности, для производства изделий, работающих в СВЧ диапазоне. Поэтому является необходимой разработка российских резистов для электронно-лучевой литографии.

Чувствительность, контрастность и зависимость толщины пленки резиста от скорости нанесения являются важными характеристиками резистов для электронно-лучевой литографии. Следовательно, необходима разработка и апробация методов, позволяющих определять перечисленные выше характеристики.

В рамках исследования новых резистов для электронно-лучевой литографии были предложены методы определения чувствительности, контрастности и зависимость толщины пленки резиста. С их помощью были измерены характеристики новых резистов на основе ПММА. Хотелось бы отметить, что в основе метода определения толщины пленки резиста лежит рентгеновская рефлектометрия, что позволяет также получить распределение плотности по толщине пленки.

УДК 547.279.2

Особенности процесса химического усиления в фоторезистах, чувствительных к излучению 248 нм**Кузнецова Н. А.¹, д. х. н., Минаков Г. С.¹, Уваров А. В.¹, Малков Г. В.², к. х. н., Курбатов В. Г.², к. х. н., Аккуратов А. В.², к. х. н., Пугачёва Т. А.², Березин Е. Н.³**¹ АО «Научно-исследовательский институт органических полупроводников и красителей»
123001, г. Москва, ул. Большая Садовая, 1/4, стр. 1
nakuznetsova@niopik.ru² Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1
gmalkov@icp.ac.ru³ АО «Микрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
eberezin@mikron.ru

Исследована сенсibilизация фотогенераторов кислоты полимерами на основе полигидроксистирила. Результаты использованы в разработке фоторезистов с толщиной пленки до 2,5 мкм, при экспозиции излучением с $\lambda = 248$ нм образующих элементы с вертикальным профилем.

Ключевые слова: фоторезист; химическое усиление; фотогенератор кислоты; 248 нм.

Для производства интегральных схем с проектными нормами 130–250 нм используются излучение лазера на эксимерах KrF* с длиной волны 248 нм и фоторезисты с химическим усилением на основе поли-4-гидроксистирила с частично защищенными гидроксильными либо карбоксильными группами. Ключевым компонентом фоторезиста с химическим усилением является фотогенератор кислоты (ФГК). Под действием света ФГК разрушается с выделением кислоты, которая при постэкспозиционной сушке снимает защиту кислотных групп полимера, изменяя растворимость полимерной основы в щелочном проявителе. Образование кислоты из ФГК в фоторезистах на основе полигидроксистирила протекает по двум механизмам — при прямом возбуждении и по механизму с переносом электрона от возбужденного полимера (донор) к ФГК (акцептор) [1].

Одним из ФГК, используемых в фоторезистах, является трифлат *N*-гидрокси-5-норборнен-2,3-дикарбоксимида (NDCI-Tf). Поглощение на длине волны 248 нм у NDCI-Tf практически отсутствует, в полигидроксистирильной матрице он активируется исключительно по механизму сенсibilизации полимером. На примере NDCI-Tf исследованы некоторые аспекты сенсibilизации фотогенераторов кислоты полимерами на основе полигидроксистирила.

Эффективность процесса оценивали по величине квантового выхода образования кислоты (Φ_{H^+}). Установлено, что величина Φ_{H^+} зависит от структуры полимерной основы. Так, наличие в полимере звена *p*-бутоксистирирол приводит к значительному росту эффективности сенсibilизации по сравнению с полимерами, в которых такое звено отсутствует. С ростом концентрации NDCI-Tf в пленке фоторезиста эффективность фотопереноса электрона также увеличивается. Трифлат

и наофлат *N*-гидрокси-5-норборнен-2,3-дикарбоксимида генерируют кислоту с близкими квантовыми выходами.

С использованием результатов исследования были разработаны фоторезисты с толщиной пленки до 2,5 мкм, при экспозиции излучением с $\lambda = 248$ нм образующие элементы с вертикальным профилем.

Литература

1. Cameron J., Chan N., Moore K., Pohlers G. // J. Photochem. Sci. Technol., 2001. Vol. 14. № 3. P. 345–356.

УДК 678.744.3:544.022:[543.4 + 543.5]

Разработка материалов для корпусирования высокопроизводительных микросхем в многовыводные полимерные корпуса**Пахомов К. С.¹, Казаков С. И.², Малков Г. В.¹, Курбатов В. Г.¹, Пугачёва Т. А.¹, Вертянов Д. В.³, Прудскова Т. Н.², Бадамшина Э. Р.¹**¹ *Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН**142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1
pahomov_kirill_sp@mail.ru*² *АО «Институт пластмасс имени Г. С. Петрова»**111024, г. Москва, Перовский проезд, 35*³ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

Проведены исследования материалов: заливной компаунд; герметизирующий, очищающий и смазывающий состав. Определены компоненты, входящие в состав импортных материалов — полимерная матрица, отвердители, катализаторы, неорганический наполнитель и др.

Ключевые слова: корпусирование микросхем; многовыводные полимерные корпуса; flip-chip; Underfill.

Повышенный интерес к корпусированию микросхем с применением технологии flip-chip обусловлен острой потребностью отечественного рынка к импортозамещению некоторых современных интегральных микросхем и систем в полимерных корпусах.

Материалы, предназначенные для герметизации и корпусирования интегральных схем и полупроводников, ранее поступали в нашу страну из-за рубежа. В наши дни российские производители различных изделий электронной техники практически лишены доступа к этим крайне необходимым материалам. Отечественные заливные герметизирующие материалы, применяемые в электронных схемах, а также композиционные полимерные материалы для корпусирования изделий микроэлектроники, которые соответствовали бы эксплуатационным характеристикам импортных аналогов, в нашей стране отсутствуют.

Современный технологический процесс корпусирования микросхем, а также других компонентов микроэлектроники предполагает применение вспомогательных материалов, таких как очищающие и смазывающие составы для пресс-форм. Применение указанных составов позволяет повышать производительность процесса корпусирования и качество готовых изделий.

Применение монтажа микросхем по технологии flip-chip предполагает использование материалов для создания подслоя (Underfill), основной задачей которого является герметизация зазора между поверхностью кристалла, припаянного к подложке, и самой подложки. Наличие подслоя позволяет улучшить теплоотвод от кристалла и повышает механическую прочность сборки.

Корпусирование интегральных схем — завершающая стадия микроэлектронного производства, в процессе которой полупроводниковый кристалл

устанавливается в корпус. Обычно состоит из этапов прикрепления кристалла на основание или носитель кристалла, электрического соединения контактных площадок кристалла с выводами корпуса и герметизации корпуса. После корпусирования следует окончательное тестирование микросхем.

В данной работе проведены исследования комплекса промышленно выпускаемых материалов для герметизации микросхем — заливочного компаунда; материала для герметизации, очищающего и смазывающего материалов. Определены основные компоненты, входящие в состав импортных материалов — полимерная матрица (смолы), отвердители, катализаторы, неорганический наполнитель, пигмент для придания окраски материалам и др. Проведенные работы по расшифровке импортных аналогов позволят минимизировать затраты времени на перебор многочисленных возможных комбинаций сырьевых компонентов, что ускорит процесс разработки серийного освоения технологий производства материалов.

УДК 53.08

Современные методы диагностики материалов и устройств микро- и нанoeлектроники

Рощупкин Д. В., Фахртдинов Р. Р., Емелин Е. В., Иржак Д. В., Пундиков К. С.
Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособленных материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
rochtch@iptm.ru

Методы высокоразрешающей рентгеновской рефлектометрии, дифрактометрии, топографии, микрофлуоресцентного анализа, растровой электронной микроскопии являются оптимальными методами для исследования материалов и структур микро- и нанoeлектроники. Данные методы позволяют исследовать структурное совершенство материалов, толщину и плотность тонкопленочных покрытий, фазовый состав материалов, параметры элементарной кристаллической решетки. Более того, данные методы позволяют исследовать работу устройств микроэлектроники в режиме реального времени.

Ключевые слова: рентгеновская рефлектометрия; рентгеновская дифрактометрия; рентгеновская топография; растровая электронная микроскопия.

Развитие микро- и нанoeлектроники требует развития современных методов диагностики материалов и устройств элементов компонентной базы. Наиболее интересными являются рентгеновские дифракционные методы и методы растровой электронной микроскопии.

Рентгеновские дифракционные методы (рефлектометрии и дифрактометрия) позволяют исследовать тонкопленочные покрытия (определение толщины пленки, распределение плотности по толщине пленки, шероховатость поверхности и толщины нарушенного слоя), изучать структурное совершенство материалов методами высокоразрешающей дифрактометрии и топографии (определение межплоскостных расстояний и параметров элементарной кристаллической ячейки, структурных дефектов кристаллической решетки — блоки, двойники, дислокации, доменные структуры), определять фазовый и элементный состав материалов с использованием методов рентгеновской дифрактометрии и микрофлуоресцентного анализа. Метод рентгеновской микроскопии позволяет визуализировать структуру процессора, а метод рентгеновской томографии позволяет получить 3D изображение процессора. Более того существуют подходы, которые позволяют визуализировать процесс работы микросхемы или процессора в режиме реального времени. На рис. 1 представлена кривая отражения многослойного рентгеновского зеркала, которое является аналогом кристаллической решетки, но для мягкого рентгеновского диапазона длин волн [1]. На дифракционной кривой можно наблюдать интенсивный брэгговский пик и толщинные осцилляции. На рис. 2 представлена рентгеновская топограмма изображения бегущей поверхностной акустической волны на поверхности кристалла $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ [2].

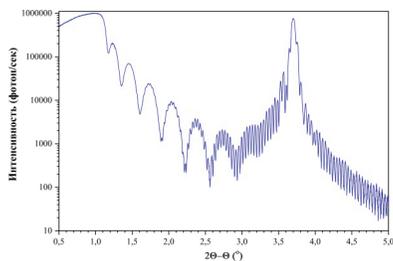


Рис. 1. Кривая отражения многослойного рентгеновского зеркала, состоящего из 200 слоев W/Si

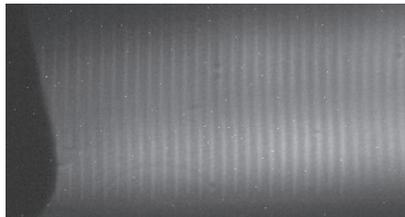


Рис. 2. Рентгеновская топограмма изображения бегущей ПАВ с длиной волны $\Lambda = 10$ мкм на поверхности кристалла $\text{La}_3\text{Ga}_3\text{SiO}_{14}$

Методы растровой электронной микроскопии позволяют визуализировать топологическую структуру процессоров, проводить исследования по слоям процессора, визуализировать дислокации методом наведенного тока, исследовать работу акусто-электронных устройств и транзисторов в режиме реального времени. Также метод электронной микроскопии позволяет изучать элементный состав материалов.

Таким образом, в докладе представлены возможности рентгеновских дифракционных методов и растровой электронной микроскопии для изучения материалов и устройств элементной компонентной базы.

Литература

1. Roshchupkin D., Ortega L., Plotitsyna O., Zizak I., Vadilonga S., Irzhak D., Emelin E. X-ray diffraction by surface acoustic waves // J. Appl. Cryst., 2021. Vol. 54. P. 180–194.
2. Roshchupkin D., Ortega L., Snigirev A., Snigireva I. X-ray imaging of the surface acoustic wave propagation in $\text{La}_3\text{Ga}_3\text{SiO}_{14}$ crystal // Appl. Phys. Lett., 2013. Vol. 103. P. 154101.

УДК 616-073.756.8,47.13.11

**Рентгеновская томография как метод дефектоскопии:
о проблеме сильнопоглощающих включений****К. ф.-м. н. Гильманов М. И.^{1,2}, д. т. н. Николаев Д. П.^{2,3}, д. т. н.
Арлазаров В. В.^{2,3}, к. ф.-м. н. Чукалина М. В.^{2,3}**¹ ИППИ РАН

127051, г. Москва, Большой каретный пер., 19, стр. 1

² ООО «Смарт Энджинс Сервис»

117312, г. Москва, просп. 60-летия Октября, 9

³ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН

119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2

chukalinamarina@gmail.com

Рентгеновская томография (РТ), как инструмент дефектоскопии, позволяет проводить полный контроль внутренней структуры компонент. Однако для точной визуализации внутренней структуры необходимо не только сформировать протокол сканирования, позволяющий регистрировать на проекциях контраст от всех областей объема таким образом, чтобы сигналы не выходили за границы динамического диапазона, но и применить для реконструкции метод, который согласован с протоколом и моделью зондируемого объекта. В работе исследована проблема построения цифрового двойника микрообъекта методом рентгеновской томографии в условиях наличия в объекте сильнопоглощающих включений. Введено понятие сильно поглощающего включения. Представлена модель формирования томографической проекции для объекта с такого типа включениями при зондировании монохроматическим излучением. Приведен алгоритм предварительной обработки проекций в целях формирования данных для выполнения томографической реконструкции. Обсуждаются примеры реконструкций.

Ключевые слова: рентгеновская томография; дефектоскопия; сильнопоглощающие включения.

Метод рентгеновской томографии позволяет выполнять дефектоскопию и проводить метрологические измерения внутренней структуры микрообъектов, без разрушения этих объектов. Несмотря на то, что методу уже более ста лет, проблема построения точного цифрового двойника объекта при наличии в нем сильнопоглощающих включений остается актуальной. Возникающие вокруг областей сильнопоглощающих включений артефакты высокой яркости на цифровом двойнике не позволяют визуализировать структуру этих областей.

Метод РТ реализуется с привлечением аппаратно-программного томографического комплекса, называемого томографом. Аппаратная часть осуществляет съемку томографических проекций. В ее состав входят источник рентгеновского излучения; оптическая часть, формирующая зонд; механическая система, обеспечивающая сбор рентгеновских изображений микрообъекта с разных ракурсов и система регистрации рентгеновских изображений. Программная часть обеспечивает следующие функции: управление сбором проекций, проведение автокалибровки каждого из узлов и системы в целом системы, подготовку измеренных данных для выполнения реконструкции и реконструкцию цифрового изображения

томографируемого объекта. В докладе представлены принципиальные схемы томографов для выполнения дефектоскопии изделий микроэлектроники.

Разделение процедуры автокалибровки и процедуры подготовки данных не случайно. Процедуры выполняются последовательно, и вторая в качестве части входных параметров использует выходные параметры первой. Процедура подготовки данных опирается на модель формирования проекций и процедуру линейаризации данных. Процедура линейаризации данных зависит от моды зондирующего излучения (монохроматичное или полихроматичное) и модели зондируемого объекта. Объект может включать области, сильно различающиеся по степени ослабления рентгеновского излучения, в частности, сильно поглощающие области. В этом случае, те лучи, которые для конкретного ракурса, пересекут данные области, ослабятся в большей степени, чем не пересекающие их. Т.е. уровень сигнала в ячейках детектора для двух типов лучей будет сильно различаться. Влияние этого фактора на качество реконструкции будет проанализировано в докладе. Примеры применения двух реконструкторов (с учетом и без учета данного влияния) показаны на рис. 1.

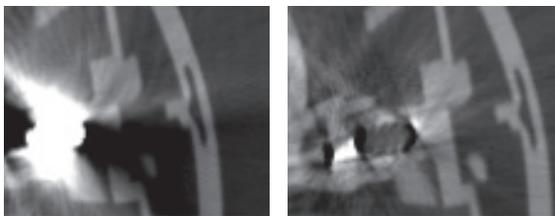


Рис. 1. Пример томографической реконструкции (участок). Слева — реконструкция проведена «классическим» алгоритмом. Справа — применялся алгоритм, учитывающий наличие сильнопоглощающих участков

Основное внимание в докладе уделяется проблеме построения цифрового двойника микрообъекта, содержащего сильнопоглощающие включения, с применением метода рентгеновской томографии, представлена модель формирования проекций, модель подготовки данных для реконструкции, метод томографической реконструкции при зондировании микрообъектов, содержащих сильнопоглощающие включения.

Литература

1. Ingacheva A.S., Gilmanov M.I., Yamaev A.V., Buzmakov A.V., Kazimirov D.D., Kunina I.A., Soldatova Zh.V., Chukalina M.V., Arlazarov V.V. Computer Tomography as an Artificial Intelligence Instrument—the Survey of Approach and Results of V.L. Arlazarov’s Scientific School // Pattern Recognit. Image Anal, 2020. Vol. 33. № 4. P. 769–783. DOI: 10.1134/S1054661823040211.

УДК 621.373.8

Методы загрузки паров щелочных металлов в газовые кюветы

Щаврук Н. В., Думчиков К. А., Гусев С. В.

ФГУП «ВНИИФТРИ»

141570, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)
shchavruk@vniiftri.ru

Для работы с атомами и другими квантовыми объектами необходимо изолировать их от внешней среды. Простейший способ изоляции атомов щелочных металлов, которые реагируют с кислородом, — поместить их в герметичную вакуумированную кювету из химически стойкого материала, прозрачного для излучения. Такую кювету называют атомной ячейкой. Обычно ячейки изготавливаются из определенных типов стекла (например, боросиликатного) и кремния. Атомные ячейки являются основой квантовых стандартов частоты и поэтому их производству и наполнению уделяется большое внимание.

Ключевые слова: атомная ячейка; атомные часы; газовые МЭМС ячейки; твердотельные источники щелочных металлов.

Для серийного производства квантовых стандартов частоты, обладающих миниатюрными габаритами, встает вопрос в миниатюризации физического блока атомных часов. Одним из важнейших компонентов физического блока является атомная ячейка, и хотя миниатюрную атомную ячейку возможно изготовить традиционным стеклодувным методом, но значительному уменьшению размеров препятствует отпаечный штенгель. При изготовлении ячейки полностью избавиться от штенгеля нельзя, так как это приведет к потере герметичности, и получается, что габаритные размеры стеклодувных ячеек определяются их «побочными» частями, и такая технология не может быть автоматизирована и не позволяет перейти к массовому производству и расширить область применения квантовых стандартов частоты. Это определяет потребность в применении масштабируемых технологий для серийного выпуска атомных часов.

Одной из технологий удовлетворяющей данным условиям является изготовление газовых ячеек по технологии МЭМС устройств. Так, наиболее шадящим процессом герметизации атомных ячеек — анодная диффузионная сварка кремниевых пластин с покровными стеклами, но стоит отметить что процесс требует температуры около 300 °С и заполнения ячейки буферными газами с высокой чистотой и точностью.

Загрузка паров щелочного металла является важнейшим вопросом при создании МЭМС газовых ячеек, а разнообразие методов загрузки говорит о том, что оптимальный метод не найден и научные группы ищут и применяют те методы, которые доступны данным научным группам.

Методы загрузки паров можно разделить на следующие типы:

- термомассперенос паров щелочных металлов в объем газовой ячейки из источника и последующее отпаивание газовой ячейки от групповой заготовки;
- непосредственная загрузка рубидия в объем газовой ячейки капельным методом;
- загрузка щелочного металла из капсул;

- разложение азидов щелочных металлов;
- твердотельные источники щелочных металлов.

Все эти методы не лишены достоинств и недостатков, но для воспроизводимого массового производства наиболее перспективными являются твердотельные источники щелочных металлов. В связи с отсутствием отечественных аналогов, нами была проведена разработка и исследование экспериментальных образцов твердотельных источников, их активация и по методу поглощения спектральных линий установлено, что пары металла выделяемого источником — это пары целевого металла пригодные для использования в квантовых стандартах частоты.

УДК 621.3

Комбинированные сканирующие микроскопы с механическим и оптическим поточечным зондированием электронных схем на микро- и нано- масштабе для измерения их локальных топографических, механических и электрических характеристик и поиска скрытых структурных дефектов**Козодаев Д. А., Трусов М. А., Дроботов Д. Д.***ООО «АКТИВНАЯ ФОТОНИКА»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10, кв./оф. 49**info@ntmdt-russia.com*

Наша компания представляет на форуме *Микроэлектроника «2024»* аналитическое оборудование Группы компаний «НТ-МДТ», одного из ведущих разработчиков оптического и зондового оборудования для нано-масштабных геометрических, механических и спектральных поточечных измерений.

Бренд «НТ-МДТ» («NT-MDT») имеет давнюю историю, и хорошо известен во всем научном мире. Команда «НТ-МДТ» была первой, кто выпустил на мировой рынок комбинированную зондово-оптическую установку для измерений спектральных свойств материалов с нанометровым латеральным разрешением, еще в 2004 г. С тех пор прошло уже 20 лет, и производитель все эти годы не стоял на месте. На сегодняшний день нами уже разработана высоко-профессиональная зондово-спектральная измерительная система нового поколения, в которой конструктивно предусмотрена максимально гибкая архитектура и заложено множество возможностей для реализации самых сложных научных экспериментов, как в оптической спектроскопии так и в зондовой наноскопии.

Одним из важных практических приложений для такого типа инструментальных разработок являются контрольно-измерительные комплексы, обеспечивающие быструю и адекватную оценку качества изготовления микро- и нано-масштабных структур современной электроники с высокой плотностью размещения элементов. Это относится как к структурам на «традиционной» кремниевой базе, так и к новым технологиям производства с использованием перспективных наноматериалов, которые сравнительно недавно начали занимать свою нишу в технологических цепочках.

Спектральная часть наших измерительных систем изначально спроектирована под удобную интеграцию с атомно-силовым микроскопом, и позволяет довольно легко выйти на режим зондового усиления спектрального сигнала в экспериментах с флуоресцентной микро-спектроскопией и рамановской микро-спектроскопией (TERS, TEPL), что позволяет, в принципе, получать оптические сигналы с образца с очень высоким пространственным разрешением, включая сведения о наличии дефектов в кристаллической решетке и данные о локальном распределении механических напряжений.

Стремясь к максимальной локализации производства зондового и спектрального оборудования на территории России, наша команда уже разработала и самостоятельно серийно выпускает твердотельные термостабилизированные лазеры видимого и ближнего ИК-диапазона для рамановской и фотолюминесцентной

спектроскопии стационарных состояний, которые можно использовать как с техникой нашего производства, так и с приборами сторонних производителей.

Конструктивная схема наших лазерных источников построена на интеграции специально отобранных лазерных диодов с отражающими объемными брэгговскими решетками, в целях выделения и стабилизации единственной моды в спектре излучения. Наши лазеры отличает высокая стабильность по мощности, узкая ширина линии излучения, гауссовский профиль пучка, высокий коэффициент подавления боковых мод. Мы выпускаем лазерные источники в диапазоне мощностей от десятков до сотен мВт, в вариантах исполнения с открытым пучком на выходе и с заводом излучения в оптическое волокно.

Также наша команда недавно инициировала перспективный проект по собственному производству охлаждаемых маломощных ПЗС камер видимого диапазона для спектральной техники, максимально локализованному на территории России, включая электронику и управляющее ПО. Сейчас мы уже вышли на серийное производство ПЗС камер научного класса, и предполагаем, что они будут применяться не только со спектральными приборами нашего производства, но и в других сложных оптических экспериментах.

УДК 621.317

Разработка набора широкополосных СВЧ зондов для измерения параметров микроэлектронных устройств на пластине**Бондаренко А. С.¹, к. т. н., Боровков А. С.^{1,2}, д. т. н., Малай И. М.^{1,2}, Михайлов П. Д.¹, Раков А. В.¹, Семёнов В. А.¹**¹ ФГУП «ВНИИФТРИ»*141570, г. Солнечногорск, рабочий посёлок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)**bondarenko@vniiftri.ru, borovkov@vniiftri.ru, malay@vniiftri.ru,**mih_pavel@vniiftri.ru, rakov@vniiftri.ru, smnv@vniiftri.ru*² *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

В работе представлены результаты разработки широкополосных СВЧ измерительных зондов с коаксиальными и волноводными соединителями. Разработана методика измерений и оценки характеристик измерительных зондов, которая содержит процедуры исключения влияния собственных характеристик зондов на результаты измерений.

Ключевые слова: измерения на пластине; векторный анализатор цепей; зондовая станция; измерительный зонд.

Измерение характеристик микроэлектронных структур на пластине необходимы для большинства изделий СВЧ микроэлектроники при разработке и серийном производстве. Данные измерения осуществляются с использованием измерительных систем, состоящих из векторного анализатора цепей (ВАЦ) и зондовой станции.

Зондовая станция представляет собой позиционер, который позволяет с высокой точностью обеспечить контактирование измерительных зондов на контактных площадках исследуемого микроэлектронного устройства. Измерительный зонд представляет собой согласованный переход из коаксиального или волноводного тракта установки на базу ВАЦ на копланарную линию (контактные площадки на исследуемом устройстве).

Измерения на пластине в России в большинстве случаев проводятся с использованием оборудования иностранного производства. Зависимость от зарубежных поставок измерительных зондов и калибровочных пластин ограничивает развитие отечественной микроэлектроники.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» решается задача разработки набора измерительных зондов, обеспечивающих коммутацию СВЧ линий передач стандартизованных трактов (коаксиальные соединители — 3,5, 2,92, 2,4, 1,85 мм и волноводные соединители — WR-15, WR-10) с копланарными линиями на пластине. Номинальное расстояние между контактами зондов «сигнал» — «земля» 100, 125, 150, 200, 250 и 500 мкм.

Метрологические характеристики измерительных зондов могут быть определены по результатам измерений их собственных комплексных коэффициентов передачи и отражения. Определение данных параметров осложнено невозможностью непосредственного подключения контактов наконечников зондов

к коаксиальному порту векторного анализатора цепей. Для решения данной задачи применяются методы однопортовых измерений S-параметров рассогласованных нагрузок [1] и метод сравнения калибровок [2].

Таблица 1. Состав набора измерительных зондов

Тип тракта		F _{max} , ГГц	Межконтактное расстояние, мкм					
			100	125	150	200	250	500
Волноводный	WR10	110	И	И	И			
	WR15	75	И	И	И			
Коаксиальный	1,85	65	И	И	И	И		
	2,4	50	С	С	С	С		
	2,9	40		И	И	И	И	И
	3,5	26,5		С	С	С	С	С
	SMA	18		С	С	С	С	С

И — изготавливается; С — обеспечивается совместимостью коаксиальных соединителей.
 С — обеспечивается совместимостью коаксиальных соединителей.
 С — обеспечивается совместимостью коаксиальных соединителей.

После измерения характеристик зондов, формируется массив данных, который применяется для реализации процедуры исключения влияния собственных характеристик зондов из результатов измерений [3].

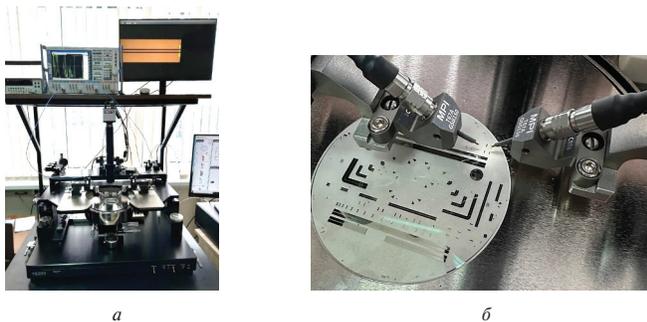


Рис. 1. а) Измерения на зондовой станции с разработанными во ФГУП «ВНИИФТРИ» коаксиальными измерительными зондами. б) Схема процедуры де-эмбединга измерений с применением зондов

В результате экспериментального исследования с использованием этих двух методов установлено, что

- 1) характеристики зондов соответствуют требованиям, предъявляемым к данным устройствам, и сопоставимы с иностранными аналогами;

- 2) каждый метод применим и имеет свои достоинства в конкретной измерительной задаче;
- 3) описаны процедуры выполнения измерений, которые рекомендуется применять при определении характеристик измерительных зондов.

Разработанную методику рекомендуется применять при исследовании характеристик измерительных зондов, входящих в состав разрабатываемого специального эталона единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных структур на пластине.

Литература

1. Maeda N., Fukui S., Ichikawa K., Sakurai Y., Sekine T. and Takahashi Y. An Estimation Method for the n Port S Parameters with n-1 Port Measurements // EMC Europe, 2013. P. 348–353.
2. МИ 3411-2013. Анализаторы цепей векторные. Методика определения метрологических характеристик.
3. Wartenberg S. A., Grajek P. De-embedding PCB fixtures for package characterization. Microwave and Optical Technology Letters, 2001. Vol. 31. Issue 2.

УДК 621.317

Метрологическое обеспечение измерений S-параметров микроэлектронных структур на пластине

Беспалова Д. А.¹, Бондаренко А. С.¹, к. т. н., Боровков А. С.^{1,2}, д. т. н.,
Малай И. М.^{1,2}, Раков А. В.¹, Семёнов В. А.¹

¹ ФГУП «ВНИИФТРИ»

141570, г. Солнечногорск, рабочий посёлок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)
bespalova@vniiftri.ru, bondarenko@vniiftri.ru, borovkov@vniiftri.ru,
malay@vniiftri.ru, rakov@vniiftri.ru, smnv@vniiftri.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

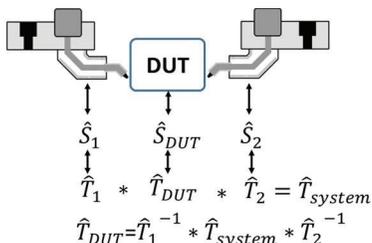
Показана актуальность разработки системы метрологического обеспечения измерений S-параметров на пластине. Представлена структура специального эталона и схема метрологической прослеживаемости единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных структур, реализованных на пластине.

Ключевые слова: измерения на пластине; комплексный коэффициент отражения; комплексный коэффициент передачи; векторный анализатор цепей; зондовая станция; калибровочная пластина; копланарная линия передачи.

Измерения S-параметров микроэлектронных устройств, реализованных на пластине, проводится на этапе контроля радиотехнических параметров при производстве современной сверхвысокочастотной микроэлектроники. S-параметры — это комплексные коэффициенты отражения (ККО) и комплексные коэффициенты передачи (ККП). Установки для измерения ККО и ККП состоят из зондовой станции, векторного анализатора цепей (ВАЦ), измерительных зондов и вспомогательного оборудования (рис. 1). Зондовая станция обеспечивает прецизионное позиционирование измерительных зондов на пластине. Измерительные зонды представляют собой специальную оснастку, которая обеспечивает возможность подключения стандартного коаксиального или волноводного тракта к контактным площадкам микроэлектронных структур на пластине [1, 2].



а



б

Рис. 1. а) Внешний вид измерительной установки,
б) Измерительные зонды и калибровочная пластина

Калибровочные пластины, измерительные зонды и зондовые станции, эксплуатируемые отечественными предприятиями микроэлектроники, произведены преимущественно за рубежом. Результаты измерений ККО и ККП производимых изделий на разных измерительных установках отличаются. Достоверность результатов измерений базируется на сведениях, предоставленных производителями калибровочных пластин, измерительных зондов и зондовых станций [3, 4]. Прослеживаемость результатов данного вида измерений к отечественным эталонам радиотехнических величин и параметров не обеспечивается. Основной причиной возникновения расхождений между результатами измерений и, соответственно метрологического брака, является отсутствие системы обеспечения единства этого вида измерений, которая включала бы в себя единые, научно обоснованные методики измерений, позволяющие проследить результат измерений к соответствующему государственному специальному эталону [5].

Калибровочные пластины и измерительные зонды являются расходным материалом. С ростом производства микроэлектроники потребность предприятий в них резко возрастает. В большинстве случаев данные устройства производятся и поставляются зарубежными компаниями [3, 4]. В текущих условиях это привело к полной зависимости технологических процессов производства отечественной СВЧ микроэлектроники от зарубежных поставок.

В связи с этим возникает необходимость создания собственной системы метрологического обеспечения в данном виде измерений [5]. Создание соответствующего специального эталона единиц ККО и ККП на пластине совместно с освоением сопутствующих технологий производства калибровочных пластин и измерительных зондов, является актуальной задачей, требующей приоритетного решения.

В настоящее время ФГУП «ВНИИФТРИ» разрабатывает специальный эталон и в кооперации с технологическими партнерами налаживает производство отечественных калибровочных пластин и зондов в целях обеспечения единства измерений на пластине [6–8].

Эталон должен состоять из ВАЦ, зондовой станции, оснащенной соответствующими тестируемой линии зондами, калибровочных пластин, а также средств измерений линейно-угловых величин, диэлектрической проницаемости, поверхностного сопротивления. В основе разрабатываемого эталона используется метод сравнения с мерой. ВАЦ совместно с зондовой станцией используется в качестве компаратора. Меры располагаются на калибровочной пластине (отрезки копланарных линий передачи, короткозамыкатели, меры холостого хода, согласованные и рассогласованные нагрузки). В качестве калибровочных пластин и измерительных зондов предполагается использовать изделия отечественного производства. Метрологическая прослеживаемость измерений ККО и ККП обеспечивается к единицам длины, частоты, сопротивления, диэлектрической проницаемости [9].

Установление единых подходов к определению метрологических характеристик эталонных мер и способов передачи единиц ККО и ККП конечному потребителю приведет к повышению достоверности результатов измерений при разработке, испытаниях и производстве продукции отечественной микроэлектроники.

Литература

1. Rumiantsev A. On-Wafer Calibration Techniques Enabling Accurate Characterization of High-Performance Silicon Devices at the mm-Wave Range and Beyond, 2014. 232 p.

2. Lourandakis E. On-Wafer Microwave Measurements and De-embedding. Artech House Publishers, 2016. 256 p.
3. AC2-2 Calibration Substrate. URL: <https://www.mpi-corporation.com/wp-content/uploads/ASTPDF/MPI-AC-2-Manual.pdf> (дата обращения: 05.07.2024).
4. URL: <https://www.mpi-corporation.com> (дата обращения: 05.07.2024).
5. Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Семёнов В. А. Эталон единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных структур на пластине // Наноиндустрия, 2021. Спецвыпуск 7s. — Т. 14. — С. 450–453. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.450.454.
6. Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Раков А. В., Семёнов В. А. Применение метода временного анализа S-параметров для оценки характеристик широкополосных измерительных зондов // Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA — 2023. Доклады XXV Международной конференции. — Москва, 2023. — С. 418–422.
7. Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Раков А. В., Семёнов В. А. Особенности разработки измерительного зонда и калибровочной пластины для обеспечения измерений S-параметров СВЧ полупроводниковых устройств // XIII всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике», Менделеево, 20–22 июня 2023 г. — Менделеево: ФГУП «ВНИИ-ФТРИ», 2023. — С. 281–286.
8. Боровков А. С., Раков А. В., Беспалова Д. А., Михайлов П. Д. Разработка методики обработки сигналов в частотной области для определения характеристик измерительных зондов // Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA — 2024. Доклады XXVI Международной конференции. — Москва, 2024. — С. 258–263.
9. Heinrich W. Quasi-TEM description of MMIC coplanar lines including conductor-loss effects // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993. Vol. 41 (1). P. 45–52. DOI: 10.1109/22.210228.

УДК 621.319.45

Электрохимическая емкость пористого кремния с углеродным покрытием

Коротичкая-Седловец Д. М.¹, Ульянова В. В.^{1,2}, Старков В. В.¹

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособленных материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
sedlovetz@iptm.ru

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработан подход к получению электродов микроконденсаторов путем создания пористого слоя на поверхности кремниевой пластины с последующим нанесением углеродного покрытия на стенки пор методом CVD. Показаны повышенные емкостные характеристики полученных структур.

Ключевые слова: пористый кремний; графеноподобные пленки; легирование; электрохимическая емкость.

Растущее применение портативного электронного оборудования определяет острую потребность в разработке компактных накопителей энергии. Проектирование эффективных миниатюрных устройств хранения энергии, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, а также их расположение непосредственно на микросхеме является высокоактуальной проблемой. В настоящее время кремниевые пластины служат основной платформой для производства полупроводниковых приборов. Поэтому они являются идеальной площадкой для интеграции элементов хранения энергии. Создание высокоразвитой поверхности кремния (формирование слоя пористого кремния (ПК) [1]) с дальнейшим внедрением углеродного материала в ее структуру (покрытие графеноподобной пленкой [2, 3]) позволяет сформировать эффективный электрод микроконденсатора (МК), интегрированный в кремниевую плату.

В ходе выполнения работы была разработана технология формирования электродов МК на поверхности кремниевых пластин:

- получены пористые слои методом анодного травления в растворах на основе плавиковой кислоты монокристаллических пластин кремния с различной ориентацией и удельным электросопротивлением;
- исследована зависимость удельной электрохимической емкости ПК от глубины пористого слоя;
- оптимизирован режим газофазного синтеза, при котором углеродное покрытие осаждается в нанопористой кремниевой структуре, покрывая стенки пор по всей глубине;
- исследованы электрохимические характеристики (удельная емкость и циклическая стабильность) полученных композитов.

В результате показано, что:

- толщина пористого слоя влияет на электрохимическую емкость электродов из ПК: при увеличении глубины (вплоть до 80 мкм) пористые структуры обладают повышенными емкостными характеристиками;

- покрытие стенок нелегированным графеновым материалом приводит к улучшению эксплуатационных характеристик пористых кремниевых электродов (увеличению емкости и циклической стабильности по сравнению с исходным ПК);
- дальнейшее повышение емкости может быть достигнуто за счет осаждения в пористой структуре углеродной пленки, легированной азотом.

Из литературных данных следует, что предлагаемый метод модификации ПК путем нанесения углеродной пленки, в т.ч. легированной азотом, позволяет получить наилучшие значения электрохимической емкости, нормированной по площади, для ПК в водном электролите (без заметных потерь после 20000 циклов).

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ
в рамках научного проекта № 24-29-00545.***

Литература

1. Starkov V. V. et al. Silicon structures with variable morphology of pores methods of obtaining physical and optical properties // Journal of The Electrochemical Society, 2018. Vol. 165. № 11. P. E534.
2. Starkov V. V., Sedlovets D. M., Gosteva E. A. Synthesis of graphene-like passivating carbon layer into nanostructured porous silicon // Applied Physics A, 2019. Vol. 125. P. 1–6.
3. Sedlovets D. M. et al. Nanoporous silicon with graphene-like coating for pseudocapacitor application // Nanomaterials, 2022. Vol. 12. № 13. P. 2191.

УДК 537.311.322

Исследование влияния типа и концентрации поверхностно-активных веществ на электропроводность углеродных нанотрубок**Едельбекова П. А.^{1,2}, Сорокин Д. В.^{1,2}, Волкова Л. С.^{1,2}, Аниканов А. А.¹, к. т. н. Шаман Ю. П.^{1,3}, д. т. н. Герасименко А. Ю.^{1,2}**¹ *Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН
119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А
edelbekova.p@inme-ras.ru*² *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*³ *НПК «Технологический центр»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7*

Исследованы электрофизические характеристики слоев одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ), осажденных спрей методом из водных суспензий ОУНТ при добавлении в качестве стабилизатора различных поверхностно-активных веществ (ПАВ), в целях выявления влияния типа и концентрации ПАВа на электропроводность слоя УНТ.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; поверхностно-активные вещества; суспензия; электропроводность; спрей метод.

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются перспективным материалом в области разработок элементов гибкой электроники, таких как биосовместимые чувствительные элементы датчиков физических величин сенсорных систем.[1, 2], благодаря выдающимся механическим, электропроводящим, термическим и оптическим свойствам.

Одним из наиболее широко востребованных элементов на основе УНТ является формируемый резистивный слой для сенсоров и датчиков. Обширные комплексные исследования зависимости электропроводности слоя углеродных нанотрубок от состава суспензии и технологических параметров процесса осаждения УНТ позволяют выбрать оптимальный технологический маршрут для изготовления устройства.

В ходе данной работы было проведено исследование влияния типа и концентрации ПАВа на электропроводность формируемого слоя УНТ. В экспериментах использовались суспензии на основе ОУНТ торговой марки Tuball с добавлением различных ПАВ в качестве стабилизатора УНТ в воде: додецилсульфата натрия, дезоксихолата натрия, холата натрия. Формирование однородных и стабильных суспензий [3] осуществлялось посредством ультразвуковой обработки с помощью погружного гомогенизатора и последующего центрифугирования (с ускорением до 18000 g) сформированной суспензии. В дальнейшем суспензия наносилась на подложку с помощью многоосевой системы распыления (SONOTEK), проводимость полученного покрытия измерялась четырехконтактным методом с помощью цифрового $7 \frac{1}{2}$ разрядного мультиметра (Keysight 34470A). Размер частиц в суспензии и дзета-потенциал измерялись методом динамического рассеяния света,

а морфология осажденных слоев УНТ контролировалась методом сканирующей электронной микроскопии.

В результате работы было изучено влияние типа и концентрации ПАВ на проводимость сформированного слоя УНТ, определены оптимальные технологические параметры формирования суспензии и осаждения слоя УНТ на подложку, включающие длительность ультразвуковой обработки и центрифугирования, температуру подложки, скорости перемещения сопла над поверхностью образца и расход суспензии в процессе формирования слоя УНТ.

***Исследования выполнены при поддержке Министерства промышленности и торговли
Российской Федерации (государственный контракт № 20411.1950192501.11.003
от 29.12.2020. идентификатор 17705596339200009540).***

Литература

1. Maghima M. et al. Enhancing biocompatibility and functionality: Carbon nanotube-polymer nanocomposites for improved biomedical applications // J. Drug Deliv. Sci. Technol., 2024. Vol. 99. P. 105958.
2. Wang R. et al. Mechanisms and applications of carbon nanotubes in terahertz devices: A review // Carbon N. Y., 2018. Vol. 132. P. 42–58.
3. Rudyak V. et al. Electrical conductivity of nanofluids with single- and multi-walled carbon nanotubes. Experimental study // Nano-Structures and Nano-Objects, 2024. Vol. 38. P. 101143.

УДК 621.3.049.77

Применение легированных азотом УНТ при создании чувствительных элементов преобразователей механической энергии

**Ильин О. И., к. т. н., Рудык Н. Н., к. т. н., Польшянова М. Р., Хомленко Д. Н.,
Ильина М. В., к. т. н.**

«Южный федеральный университет»,

Институт нанотехнологии, электроники и приборостроения

347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е

oiilin@sfnu.ru

Разработан и изготовлен макета преобразователя энергии с чувствительным элементом на основе легированных азотом вертикально ориентированных углеродных нанотрубок. Проведено исследование его выходных характеристик. Показана перспективность применения разработанного макета в качестве преобразователя механической энергии как в качестве наногенератора для питания устройств носимой электроники, так и в качестве высокочувствительного сенсора деформации для сейсмочувствительных сенсоров, датчиков деформации и микрофонов.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; пьезоэлектрический эффект; преобразователи энергии; легирование азотом.

В настоящий момент электронные устройства стали неотъемлемой частью современной жизни. Развитие микроэлектроники позволило значительно оптимизировать и создать как новые интегральные схемы со сниженным энергопотреблением и размерами, так и различные типы сенсоров и датчиков [1]. Большое развитие получили разработки в области имплантируемых электронных устройств. Однако проблема обеспечения таких устройств питанием, а также создание высокочувствительных и энергоэффективных сенсоров делает актуальными исследования в данном направлении.

Для решения данной проблемы перспективно создание новых альтернативных преобразователей энергии на основе наноматериалов с пьезоэлектрическими свойствами, способных эффективно трансформировать вибрации окружающей среды (ветра, воды, звука, температуры) и деятельности человека (ходьбы, сгибания мышц, биения сердца, и т. п.) в электрический сигнал. Ранее было показано [2], что аномальный пьезоэлектрический эффект, высокий модуль Юнга, а также возможность направленного роста легированных азотом углеродных нанотрубок (N-УНТ) делает их перспективным материалом для создания преобразователей энергии. Цель данного исследования — разработка и изготовление макета преобразователя энергии с чувствительным элементом на основе легированных азотом вертикально ориентированных углеродных нанотрубок и исследование его характеристик.

В ходе работы была разработана конструкция макета преобразователя механической энергии с верхним профилированным электродом и технологический маршрут его изготовления. Проведены исследования влияния материала верхнего профилированного электрода на величину выходных параметров (тока и напряжения), генерируемых массивом вертикально ориентированных N-УНТ в процессе

их деформации. Показано, что наибольшие значения выходного напряжения наблюдаются на массиве N-УНТ с Mo электродом. Изготовлен макет преобразователя механической энергии и исследованы выходные параметры макета (генерируемых тока и напряжения) от амплитуды и частоты внешнего механического воздействия. Показано, что с увеличением амплитуды раскачки от 3,5 до 95 мкм происходит линейное увеличение выходного напряжения от 3 до 60 мВ, связанное с увеличением величины деформации N-УНТ. С увеличением частоты вибрации от 15 до 120 Гц при фиксированной амплитуде сигнала ($\pm 1,5$ В) происходит уменьшение выходного напряжения макета от 54 до 26 мВ, что обусловлено превышением частоты вибрации собственной резонансной частоты сжатой N-УНТ и, как следствие, уменьшением амплитуды вынужденных колебаний с увеличением частоты внешнего воздействия.

Установлено, что значительное влияние на выходное напряжение макета оказывает позиционирование элементов конструкции друг относительно друга и сила прижима в системе «верхний электрод-N-УНТ», ограничивающая подвижность вершин нанотрубок и их резонансную частоту колебаний. В частности, при обеспечении жесткого прижима верхнего электрода к вершинам N-УНТ наблюдается снижение уровня выходного напряжения, но повышение стабильности работы и воспроизводимости характеристик. При слабом прижиме наблюдается увеличение выходного напряжения и рабочей частоты, а также высокая чувствительность макета к случайным внешним вибрациям окружающей среды и генерацией выходного напряжения макета около 25 мВ под действием вибраций, создаваемых движением пальцев.

Показана перспективность применения разработанного макета в качестве преобразователя механической энергии в электрический сигнал как в качестве наногенератора для питания устройств носимой электроники, так и в качестве высокочувствительного сенсора деформации (сейсмочувствительных сенсоров, датчиков деформации и микрофонов).

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10163,
<https://rscf.ru/project/22-79-10163/> в Южном федеральном университете.*

Литература

1. Lemaire E., Thuau D., Sou tre M., Zgainski L. et al. Revisiting two piezoelectric salts within an eco-design paradigm for sensors and actuators applications // Sensors and Actuators A: Physical, 2021. Vol. 318. P. 112483.
2. Il'ina M. V., Soboleva O. I., Khubezov S. A., Smirnov V. A., Il'in O. I. Study of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes for Creation of Piezoelectric Nanogenerator // Journal of Low Power Electronics Applications, 2023. Vol. 13. № 1. Iss. 11. P. 1–11.

УДК 621.382

III-нитридные НЕМТ гетероструктуры с ультратонким барьером AlN: исследование транспортных свойств и экспериментальное применение

Гусев А. С., Рыжук Р. В., Султанов А. О., Неволина Т. Н., Сафаралиев Г. К., Каргин Н. И.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

ASGusev@mephi.ru

Методом МЛЭ с плазменной активацией азота получены III-нитридные НЕМТ гетероструктуры, содержащие ультратонкий барьер AlN. Выполнено экспериментальное исследование и теоретическое описание транспортных свойств таких структур. Изучено влияние толщины барьерного слоя на их электрофизические параметры. Изготовлены тестовые СВЧ транзисторы с затвором Шоттки. Предложена параметрическая модель НЕМТ на основе AlN/GaN ГС. **Ключевые слова:** молекулярно-лучевая эпитаксия; GaN; ультратонкий AlN барьер; гетероструктура; электронный транспорт; 2D электронный газ.

III-нитридные НЕМТ-гетероструктуры — это основа для формирования мощной СВЧ электронной компонентной базы. В настоящее время известно много вариантов $A^{III}N$ гетероэпитаксиальных структур (ГС) с 2D электронным газом. Наиболее распространенными и изученными являются ГС с барьерным слоем на основе тройных соединений. Альтернативу им ввиду ряда преимуществ (низкое слоевое сопротивление и подавление короткоканальных эффектов) могут составить ГС с ультратонким барьером AlN [1–5]. Рекордные значения $\rho_s = 120\text{--}130 \text{ Ом}/\square$ получены авторами [3, 5] именно для таких структур. Поэтому целью работы являлось получение и исследование ГС с ультратонким AlN барьером, включая изготовление тестовых СВЧ транзисторов, измерение их параметров и характеристик.

Экспериментальные ГС, содержащие ультратонкий барьер из нитрида алюминия ($\approx 5 \text{ нм}$), выращивали в установке МЛЭ GEN 930 («Veeco»), оснащенной азотно-плазменным активатором. Мощность ВЧ-плазмы и поток азота составляли 350 Вт и 1,6 стандартных кубических сантиметров в минуту, соответственно. Нуклеационный слой AlN толщиной 40 нм формировался в азот-обогащенных условиях ($F_{Al}/F_N \sim 0,6$) при стационарном потоке алюминия. При выращивании буферного GaN слоя толщиной 1700 нм в азот стабилизированных условиях применялась ММЕ методика ($t_1 = 8 \text{ с}$; $t_{II} = 14 \text{ с}$). Затем при стационарных условиях формировался AlN барьер различной толщины ($d \leq 5 \text{ нм}$). Слоевое сопротивление оптимизированных ГС составило менее 230 Ом/, удельное сопротивление буферного GaN слоя $\sim 10^8 \text{ Ом}/\square$, плотность прорастающих дислокаций $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ (по данным XRD), шероховатость поверхности $\leq 0,7 \text{ нм}$.

Выполнено экспериментальное исследование и теоретическое описание транспортных свойств AlN/GaN ГС с ультратонким барьером. Показано, что в диапазоне n_s , характерном для AlN/GaN НЕМТ ГС ($n_s > 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$), заметный вклад в рассеяние носителей заряда вносит шероховатость гетерограницы. Причем

влияние шероховатости на подвижность оказывается существенно выше, чем в классических AlGaIn/GaN гетерокомпозициях с n_s в диапазоне $5 \cdot 10^{12} \dots 1 \cdot 10^{13}$.

На основе экспериментальных ГС были изготовлены тестовые СВЧ транзисторы с затвором Шоттки ($L_g = 150$ нм). Анализ статических ВАХ изготовленных приборов показал, что они имеют максимальный ток насыщения стока до 1,4 А/мм (при $U_{GS} = +2,5$ В), крутизну характеристики G_m до 330 мСм/мм и сопротивление в открытом состоянии $R_{on} = 2,8$ Ом·мм. Для анализа работоспособности транзисторов в СВЧ диапазоне выполнялись измерения S-параметров экспериментальных структур в двухсекционном исполнении с $W_g = 2 \times 50$ мкм. Оценка предельных частот усиления по току f_t и мощности f_{max} приводит к значениям 50 и 80 ГГц, соответственно. Усиление на частоте 20 ГГц составило 11–12 дБ.

Предложена параметрическая модель НЕМТ на основе AlN/GaN ГС, позволяющая охарактеризовать выходные характеристики транзистора с погрешностью менее 5%, а также S-параметры в диапазоне частот от 0,5 до 25,5 ГГц.

Литература

1. Meyer D. J. et al. High electron velocity submicrometer AlN/GaN MOS-HEMTs on freestanding GaN substrates // IEEE Electron Device Letters, 2013. Vol. 34. № 2. P. 199–201.
2. Xue J. S., Zhang J. C., Hao Y. Ultrathin barrier AlN/GaN high electron mobility transistors grown at a dramatically reduced growth temperature by pulsed metal organic chemical vapor deposition // Appl. Phys. Lett., 2015. Vol. 107. I. 4. article ID 043503.
3. Cao Y., Wang K., Li G., Kosel T., Xing H., Jena D. MBE growth of high conductivity single and multiple AlN/GaN heterojunctions // Journal of Crystal Growth, 2011. Vol. 323. Iss. 1. P. 529–533.
4. Harrouche K., Kabouche R., Okada E. and Medjdoub F. High Performance and Highly Robust AlN/GaN HEMTs for Millimeter-Wave Operation // IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2019. Vol. 7. P. 1145–1150.
5. Chang C. Y. et al. Very low sheet resistance AlN/GaN high electron mobility transistors // Proc. CS MANTECH Conference, 2009. P. 18–21.

УДК 538.956

Методы изменения диэлектрической проницаемости в пленках $\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$ для применения в конденсаторах ячеек DRAM

Хакимов Р. Р., Черникова А. Г., Маркеев А. М.

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
khakimov.rr@mipt.ru

Рассмотрены методы изменения диэлектрической проницаемости в пленках HZO для применения в элементах памяти DRAM.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики; диэлектрики; диэлектрическая проницаемость; DRAM; EOT.

Масштабирование латеральных размеров конденсаторов ячеек памяти с произвольным доступом (DRAM) может повысить уровень интеграции в таких устройствах. Однако, в основном это происходит за счет уменьшения площади конденсаторов, что приводит к снижению емкости ячеек. При этом уменьшение физической толщины диэлектрика конденсатора также уже практически достигло предела из-за высоких значений токов утечки [1]. И хотя в настоящее время в промышленности в качестве слоя с высокой диэлектрической проницаемостью (ϵ) используется ZAZ ($\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$) [2], оптимизация его свойств также достигла своего предела [3]. В результате активно продолжается поиск альтернативных диэлектрических *high-k* материалов для ячеек DRAM в целях достижения более низких значений эквивалентной оксидной толщины SiO_2 (EOT). $\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$ (HZO) недавно привлек внимание, как новый кандидат на использование в конденсаторах DRAM, из-за его высокого значения диэлектрической проницаемости и совместимости с КМОП-технологией [4]. Известно, что HZO может иметь различные значения диэлектрической проницаемости в зависимости от кристаллической фазы: 20–25 для моноклинной фазы, 30–35 для орторомбической и 35–40 для тетрагональной фазы [5]. Исследования показали, в подобных сегнетоэлектрических материалах приложенное электрическое поле вызывает фазовый переход пленки, что приводит к высоким значениям ϵ . На данный момент в пленке HZO достигается максимальное значение ϵ около 45 [6]. Помимо этого, известно, что легирование La таких пленок может дополнительно повысить значение ϵ , также за счет изменения фазового состава [7].

В данной работе рассмотрены методы изменения диэлектрической проницаемости в пленках HZO, такие как легирование лантаном, дополнительная процедура быстрого термического отжига (БТО) при различных температурах. Кроме того, исследовано влияние многократного переключения электрическим полем (wakeUp) на значение диэлектрической проницаемости. Для определения значения ϵ был использован импульсный метод измерения, наиболее подходящий для ее оценки при работе ячеек DRAM. Было продемонстрировано, что добавление La в пленки HZO и дополнительный БТО позволяют значительно повысить величину диэлектрической проницаемости, сохраняя низкие утечки в структуре, что важно для применений в конденсаторах памяти DRAM.

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий МФТИ при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации за доступ к оборудованию.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 23-19-00227, <https://rscf.ru/project/23-19-00227>.*

Литература

1. Robertson J. and Wallace R. M. High-k materials and metal gates for CMOS applications // Mater. Sci. Eng., R: Rep., 2015. Vol. 88. P. 1–41.
2. Wu Y.-H., Kao C.-K., Chen B.-Y., Lin Y.-S., Li M.-Y. and Wu H.-C. High density metal-insulator-metal capacitor based on $ZrO_2/Al_2O_3/ZrO_2$ laminate dielectric // Appl. Phys. Lett., 2008. Vol. 93. № 3. Art. № 033511.
3. Kim S. K., Lee S. W., Han J. H., Lee B., Han S. and Hwang C. S. Capacitors with an equivalent oxide thickness of <0.5 nm for nanoscale electronic semiconductor memory // Adv. Funct. Mater., 2010. Vol. 20. № 18. P. 2989–3003.
4. Park M. H., Kim H. J., Kim Y. J., Moon T., Kim K. D. and Hwang C. S. Thin $Hf_xZr_{1-x}O_2$ films: A new lead-free system for electrostatic supercapacitors with large energy storage density and robust thermal stability // Adv. Energy Mater., 2014. Vol. 4. № 16. Art. № 1400610.
5. Müller J., Böscke T. S., Schröder U., Mueller S., Bräuhäus D., Böttger U., Frey L. and Mikolajick T. Ferroelectricity in simple binary ZrO_2 and HfO_2 // Nano Lett., 2012. Vol. 12. № 8. P. 4318–4323.
6. Ni K., Smith J., Ye H., Grisafe B., Rayner G. B., Kummel A. and Datta S. A novel ferroelectric superlattice based multi-level cell non-volatile memory // IEDM Tech. Dig., 2019. P. 28.
7. Kozodaev M. G., Chernikova A. G., Khakimov R. R., Park M. H., Markeev A. M. and Cheol Seong Hwang. La-doped $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ thin films for high-efficiency electrostatic supercapacitors // Appl. Phys. Lett., 2018. 113, 123902.

УДК 621.3.049

Синтез и свойства двумерных дихалькогенидов переходных металлов, получаемых химическим осаждением из газовой фазы и сульфидизацией ALD оксидов Mo/W**Забросаев И. В., Козодаев М. Г., к. ф.-м. н., Романов Р. И., к. ф.-м. н., Черникова А. Г., к. ф.-м. н., Маркеев А. М., д. т. н.***Центр коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9 zabrosaev.iv@mipt.ru*

Исследовано влияние параметров синтеза пленок 2D ДПМ на их структурные и электронные свойства: изучены зависимости от температуры синтеза и толщины пленок. Продемонстрирована интеграция 2D ДПМ в гетероструктуры с различными материалами, включая сверхтонкие high-k-диэлектрики. На основе полученных ДПМ изготовлены транзисторы и фотодетекторы и измерены их основные характеристики.

Ключевые слова: дихалькогениды переходных металлов; атомно-слоевое осаждение; сульфидизация; металл-органическое осаждение из газовой фазы; полевой транзистор; фотодетектор.

Двумерные пленки дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), в частности MoS_2 и WS_2 , обладают уникальными структурными и электронными свойствами, что делает их перспективными для использования в полевых транзисторах, фотодетекторах и других электронных и оптоэлектронных устройствах нового поколения [1]. В частности сверхтонкие пленки MoS_2 и WS_2 позволяют повысить электростатический контроль канала в полевых транзисторах и обладают управляемой шириной запрещенной зоны [2]. Также их отличительной особенностью является Ван-дер-Ваальсова связь отдельных слоев, что делает их совместимыми с широким спектром различных материалов и позволяет использовать их в многослойных гетероструктурах [3]. Для отработки технологии изготовления высококачественных MOCVD пленок, а также возможности управления их характеристиками требуется понимание влияния условий роста на структуру, химическое состояние и электронные качества ДПМ. В рамках исследований было изучено влияние температуры MOCVD процесса на свойства пленок в диапазоне от 650 до 950 °C, которые показали, с одной стороны улучшение кристаллической структуры с ростом температуры, но с другой увеличение сопротивления пленок с 4 кОм·см до 39 кОм·см, также было обнаружено немонотонное изменение размера кристаллитов [4]. Кроме того, было проведено исследование влияния толщины пленок WS_2 , синтезированных методом сульфидизации ACO-осажденного WO_3 , на их свойства. Было установлено, что увеличение толщины оксидной пленки с одной стороны приводит к уменьшению размера зерен, но с другой также уменьшает долю аморфной фазы и плотность дефектов, что приводит к снижению сопротивления пленок с $\sim 10^6$ до $\sim 10^3$ мкОм·см [5]. Была также показана возможность роста сверхтонких <3 нм

сплошных пленок high-k-диэлектрика HfO_2 на пленках ДПМ [6]. На основе синтезированных материалов были изготовлены полевые транзисторы со сверхтонким каналом, показавшие модуляцию до $\sim 10^4$ раз, ток I_{on} в которых был ограничен контактным сопротивлением. Фотоэффект в синтезированных пленках был продемонстрирован на гетероструктурах на основе MoS_2 и графена, которые показали фотоотклик 0,7 А/Вт и внешнюю квантовую эффективность 0.03 благодаря встроенному электрическому полю в слое MoS_2 , способствующему эффективному разделению фотогенерированных носителей заряда [7]. В целом, проведенные исследования показали значительную гибкость управления свойствами синтезируемых ДПМ пленок и перспективность их применения в электронике и фотоэлектронике.

В части синтеза 2D ДПМ работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-19-00278), а в части исследования структур дифракционными методами работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания по соглашению 075-03-2024-117 от 17.01.2024 г. (проект FSMG-2023-0006).

Литература

1. Desai S. B. et al. MoS_2 transistors with 1-nanometer gate lengths // Science, 2016. Vol. 354. P. 99–102. McDonnell S. J., Wallace R. M. Atomically-thin layered films for device applications based upon 2D TMDC materials. Thin Solid Films 2016, 616, 482–501.
2. Lopez-Sanchez O., Llado E. A., Koman V., Morral A. F., Radenovic A., Kis A. Light generation and harvesting in a van derWaals heterostructures // ACS Nano, 2014. 8, 3042–3048.
3. Jayachandran D., Pendurthi R., Sadaf M. U. K. et al. Three-dimensional integration of two-dimensional field-effect transistors // Nature, 2024. 625. 276–281.
4. Romanov R. I., Zabrosaeв I. V., Chouprik A. A., Yakubovsky D. I., Tatmyshevskiy M. K., Volkov V. S., Markeev A. M. Temperature-Dependent Structural and Electrical Properties of Metal-Organic CVD MoS_2 Films // Nanomaterials, 2023. 13, 2712. URL: <https://doi.org/10.3390/nano13192712>.
5. Romanov R. I., Kozodaev M. G., Chernikova A. G., Zabrosaeв I. V., Chouprik A. A., Zarubin S. S., Novikov S. M., Volkov V. S., Markeev A. M. Thickness-Dependent Structural and Electrical Properties of WS_2 Nanosheets Obtained via the ALD-Grown WO_3 Sulfurization Technique as a Channel Material for Field-Effect Transistors // ACS Omega, 2021. 6 (50). P. 34429–34437.
6. Kozodaev M. G., Lebedinskii Yu. Yu., Zabrosaeв I. V., Romanov R. I., Yakubovsky D. I., Novikov S. M., Tatmyshevskiy M. K., Volkov V. S., Markeev A. M. Low-Energy He^+ Ions Induced Functionalization of the MoS_2 Surface for ALD HfO_2 Growth Enhancement, The Journal of Physical Chemistry C, 2023. 127 (34), 17014–17020. DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c00578.
7. Markeev A. M., Romanov R. I., Kozodaev M. G., Lebedinskii Y. Y., Zabrosaeв I. V., Guberna E. A. Band alignment of graphene/ MoS_2 /FTO heterojunction for photode-tector application // Phys. Status Solidi A, 2021.

УДК 544.228

О применимости принципа Гиббса — Кюри — Вульфа при расчетах анизотропии поверхностной энергии кристаллов

Бокарев В. П., д. т. н., Красников Г. Я., д. т. н., академик РАН.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

vbokarev@niime.ru

В работе показано, что принцип Гиббса — Кюри — Вульфа, основанный на применении законов равновесной термодинамики к реальным кристаллам и используемый при расчетах анизотропии поверхностной энергии, нуждается в уточнении, так как не учитывает связь удельной поверхностной энергии с физической устойчивостью граней кристалла.

Ключевые слова: принцип Гиббса — Кюри — Вульфа; теорема Вульфа; поверхностное натяжение; анизотропия поверхностной энергии; капиллярная постоянная.

В экспериментальных работах Г. Вульфа по изучению роста и растворения кристаллов соли Мора было найдено, что грани с максимальной ретикулярной плотностью атомов имеют максимальную площадь поверхности и минимальную скорость роста и растворения, т. е. максимальную физическую устойчивость [1]. Но так как в соответствии с теоретическим уравнением Гиббса такое поведение должно было свидетельствовать о минимальном значении поверхностной энергии, то это и было зафиксировано принципом Гиббса — Кюри — Вульфа, основанном не на экспериментальных данных, а на законах равновесной термодинамики. Однако максимальная физическая устойчивость к процессу растворения, свидетельствует о максимальной энергии, необходимой для удаления атомов с такой поверхности, что, в свою очередь должно свидетельствовать о максимальном значении удельной поверхностной энергии таких граней по определению, так как поверхностная энергия — это энергия, необходимая для удаления атома или единичной поверхности с данной грани кристалла [2].

В своей статье о равновесной форме веществ Пьер Кюри отмечал, что «если несколько поверхностей раздела s_1, s_2, s_3 с капиллярными постоянными (поверхностными энергиями) k_1, k_2, k_3 ограничивают кристалл, то термодинамически устойчивой формой будет та, при которой сумма $s_1k_1 + s_2k_2 + s_3k_3$ будет минимальной, но без внешних воздействий кристалл не может изменить свою форму» [3]. Однако, последняя фраза основополагающей работы Пьера Кюри не учитывается теоремой Георгия Вульфа [1].

Поэтому в подавляющем большинстве экспериментальных случаев термодинамически устойчивая равновесная форма кристалла, при которой энергия Гиббса должна быть минимальной, не достигается и теорема Вульфа для расчета анизотропии поверхностной энергии должна иметь обратную зависимость.

Этим можно объяснить разнообразие огранки кристаллов одного и того же вещества или минерала из-за различий в работе адсорбции примесей на его разных гранях при различиях в условиях роста. Так нитевидные кристаллы растут фактически в соответствии с минимизацией энергии Гиббса из-за наличия примеси на наиболее устойчивой грани, снижающей ее удельную поверхностную энергию.



В любом кристалле межплоскостные расстояния зависят от индексов Миллера выбранной плоскости, причем наиболее плотноупакованные атомами плоскости имеют наибольшие межплоскостные расстояния и наименьшие скорости роста и растворения, что свидетельствует о том, что единица площади таких поверхностей обладает максимальной в кристалле энергией для удержания атомов на поверхности, т. е. свидетельствует о максимальном значении удельной поверхностной энергии таких граней. Однако вопрос об анизотропии удельной поверхностной энергии не решен до настоящего времени. И при ее теоретических расчетах до сих пор используют принцип Гиббса—Кюри—Вульфа, хотя накоплено много экспериментальных работ, свидетельствующих о несоблюдении этого принципа [4–9]. Об этом же свидетельствуют и расчеты анизотропии удельной поверхностной энергии по ряду теоретических работ, в том числе и расчеты по разработанной нами модели координационного плавления кристалла [10, 11]. Проведенные по данной модели расчеты позволили с высокой точностью рассчитать температуру поверхностного плавления металлических кристаллов и величины поверхностной энергии всех элементов периодической системы Д. И. Менделеева в кристаллическом состоянии. При этом полученная анизотропия поверхностной энергии оказалась обратной к анизотропии рассчитанной с учетом принципа Гиббса—Кюри—Вульфа.

Литература

1. Вульф Ю. В. Избранные работы по кристаллофизике и кристаллографии. — М.-Л.: Гостехиздат, 1952. — 343 с.
2. Иноуэ К., Китахара А., Косеки С., Мамамуси Р., Накаса С., Сома Х., Тамару К., Танака Х. Капиллярная химия. — М.: Мир, 1983. — 272 с.
3. Пьер Кюри. Об образовании кристаллов и о капиллярных постоянных их различных граней. Избранные труды. — М.-Л.: Наука, 1966. — С. 114–117.
4. Nelson R. S., Marzey D. J., Barnes R. S. // *Phil. Mag.*, 1965. Vol. 11. № 109. P. 91–111.
5. Farrell K., Loh B. T. M., Stiegler J. O. // *Trans. Amer. Soc. Metal.*, 1967. Vol. 60. P. 485–493.
6. Hayakawa Teruo // *Bull. Chem. Soc. Jap.*, 1957. Vol. 30. № 3. P. 236–243.
7. Келли А. Высокопрочные материалы. — М.: Мир, 1976. — 264 с.
8. Matsuo Naoto, Hirofujii Yuichi // *Abstrs 18th (1986 Int) Conf. on Solid State Devices and Materials*. Tokio, 1986. P. 41–44.
9. Plummer E. W., Rhodin H. // *J. Chem. Phys.*, 1968. Vol. 49. P. 3479–3496.
10. Bokarev V. P., Krasnikov G. Ya. // *Surface Science*, 2018. Vol. 668. P. 73–79.
11. Бокарев В. П. Поверхность и физико-химические свойства кристаллов. — М.: МФТИ, 2018. — 146 с.

УДК 621.3.049

Закономерности формирования канальной неоднородности в монокристаллах InSb (Te), выращенных в кристаллографических направлениях [111], [110], [100], [112]**Журавлев Е. О.^{1,2}, Козлов Р. Ю.^{1,2}, Белов А. Г.¹, Молодцова Е. В.¹, Комаровский Н. Ю.^{1,2}, Князев С. Н.^{1,2}, Нестюркин М. С.^{1,2}**¹ АО «Гиредмет» имени Н. П. Сажина

111524, г. Москва, ул. Электродная, 2, стр. 1

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

В работе были исследованы физические закономерности развития канальной неоднородности в монокристаллах InSb (Te), выращенных методом Чохральского в трех различных кристаллографических направлениях. Впервые присутствие канальной неоднородности обнаружено в кристаллах с ориентацией (100), (211), (110). Предложен подход к управлению величиной канала в монокристаллах [111].

Ключевые слова: A^{III}B^V; антимонид индия; метод Чохральского; канальная неоднородность.

Монокристаллы InSb являются наиболее востребованным материалом при производстве матричных и линейных фотоприемников, работающих в диапазоне длин волн 3–5 мкм [1]. Как правило, подложки InSb имеют кристаллографическую ориентацию (100) и нарезаются из монокристаллов, выращенных в направлении [100]. В связи развитием технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при изготовлении матричных ФПУ в настоящее время все более широко применяются подложки InSb с кристаллографической ориентацией (111). Помимо данного факта пластины InSb (111), за счет высокой ретикулярной плотности, позволяют обеспечить Гауссово (нормальное) распределение легирующей примеси в процесс ионной имплантации

При этом подложки (111) могут быть нарезаны как из монокристаллов, выращенных непосредственно в направлении [111], так и из монокристаллов, выращенных в других кристаллографических направлениях (рис. 1).

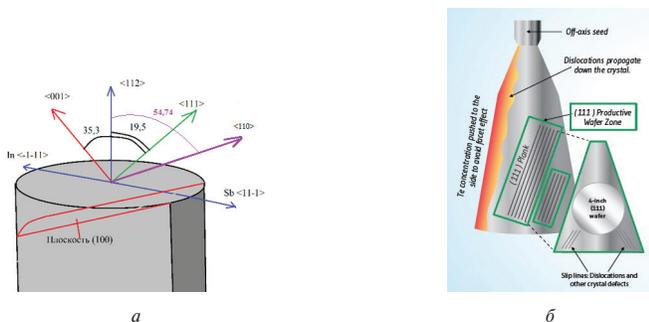


Рис. 1 — а) расположения направлений [100], [110], [111], [112] в пространстве. б) кристаллография эффекта канальной неоднородности [2]

Целесообразность выращивания монокристаллов антимонида индия для получения подложек InSb(111) в кристаллографических направлениях [100], [110], [112] обоснована, в первую очередь, необходимостью устранения канальной неоднородности в растущем монокристалле. Данный эффект заключается в активном захвате примесных атомов плоскостями семейства {111} и наиболее ярко выражен при выращивании в направлении [111] рис. 1б, табл. 1.

Таблица 1. Концентрационная неоднородность в монокристаллах, выращенных в различных направлениях

Направление выращивания	Заданный диапазон концентрации свободных носителей заряда (77 К)	Выход канала на периферию монокристалла	Концентрация свободных носителей заряда в начале кристалла (77 К)	
			В канале	Вне канала
[111]	Te ($n \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	Конец кристалла		
	Te ($n \sim 3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$)		$1,62 \cdot 10^{15}$	$5,67 \cdot 10^{14}$
[100]	Te ($n \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	Начало кристалла	$6,84 \cdot 10^{17}$	$5,64 \cdot 10^{17}$
[110]	Te ($n \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	Начало кристалла	$6,37 \cdot 10^{17}$	$5,25 \cdot 10^{17}$
[112]	Te ($n \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	Начало кристалла		

Установлено, что канальная неоднородность в монокристаллах [112], [100], [110] формируется в ходе выхода слитка на диаметр и наблюдается в виде небольших сегментов, расположение которых соответствует расположению плоскостей {111} (рис. 2). В свою очередь в кристаллах, выращенных в направлении [111], канал находится в центре монокристалла и его линейные размеры (d) значительно больше. Выявлено, что неоднородность по концентрации свободных носителей заряда проявляется как в сильнолегированных кристаллах ($n \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$), так и в нелегированном InSb ($n \sim 3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, 77К).

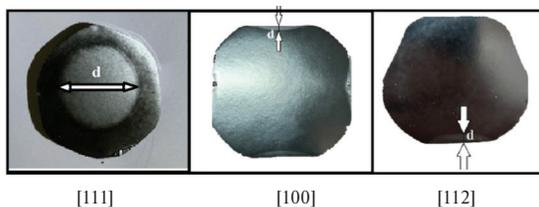


Рис. 2. Канальная неоднородность в монокристаллах, выращенных в различных кристаллографических направлениях

Нами было показано, что исключение канальной неоднородности возможно также за счет поиска оптимальных тепловых и динамических условий выращивания монокристаллов в [111], что в перспективе, позволяет значительно повысить выход годной продукции. Главным условием является создания плоского фронта кристаллизации, путем снижения осевых и радиальных температурных градиентов [3]. Необходимо отметить, что создание плоского фронта может привести как к разрастанию канала на всю ширину слитка, так и к его выходу на периферию в виде сегментов (рис. 3). Механизм данного физического явления требует отдельного исследования.



Рис. 3. Развитие канальной неоднородности при изменении температурных и динамических условий выращивания монокристалла InSb в направлении [111]

Литература

1. Наумов А. В., Попов В. К. Современные охлаждаемые фотоприемные устройства ИК-диапазона. Динамика рынка до и после пандемии // Системы безопасности, 2020. — № 3. — С. 68–70.
2. https://www.opli.net/opli_magazine/eo/2016/developments-in-on-axis-insb-crystal-growth-for-volume-manufacturing-of-high-performance-wafer-substrates-apr-news.
3. Комаровский Н. Ю., Пархоменко Ю. Н., Молодцова Е. В., Журавлёв Е. О., Чупраков В. А., Козлов Р. Ю., Князев С. Н., Белов А. Г. Физические и технологические причины возникновения канальной неоднородности в монокристаллах InSb, сильнолегированных Te // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 2024. — № 27 (1). — URL: <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202312.571>.

УДК 537.633.9

Магнитоэлектрический эффект в структурах с аморфным магнитным сплавом и пьезоэлектрическим монокристаллом

Джапаридзе М. В.^{1,2}, Фетисов Л. Ю.², д. ф.-м. н., Фетисов Ю. К.², д. ф.-м. н., Савельев Д. В.², к. ф.-м. н., Федулов Ф. А.², к. т. н., Мусатов В. И.², Болотина Е. В.², Турутин А. В., к. ф.-м. н.³

¹ ООО «Совместное предприятие «Квантовые технологии»»

121205, г. Москва, тер. Сколково инновационного центра, ул. Нобеля, 1
MVDzhaparidze@rosatom.ru

² МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Исследованы возможности применения магнитоэлектрических композитов для создания элементов новой электронно-компонентной базы и продемонстрирована возможность использования композита метглас/ланггатат/метглас в качестве датчика магнитных полей.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект; композитные структуры; ячейки памяти; датчик магнитных полей; монокристаллы.

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект — изменение поляризации материала в магнитном поле (прямой эффект) или намагниченности в электрическом (обратный эффект) [1]. Это явление исследуется чаще всего в искусственных МЭ-композитах — механически связанных пьезоэлектрических (ПЭ) и магнитострикционных (МС) материалах (рис. 1а, б). Прямой МЭ-эффект в них возникает так: в магнитном поле МС-материал деформируется, вызывая механические напряжения в ПЭ-материале, на гранях которого за счет ПЭ-эффекта возникает разность потенциалов (рис. 1в). Для генерации обратного эффекта на ПЭ-материал подают электрическое поле, которое его деформирует, возникающие при этом механические напряжения МС-материала за счет эффекта Виллари вызывают изменение намагниченности (рис. 1з) [1].



Рис. 1. Схематическое изображение (а) двухслойного и (б) трехслойного МЭ-композитов и принцип появления в них (в) прямого и (з) обратного МЭ-эффекта

МЭ-эффект позволяет напрямую превращать магнитное поле в электрическое и наоборот, что уже использовано при создании датчиков, но место столь полезному явлению нашлось и в устройствах микроэлектроники. Так, управление намагниченностью с помощью электрического поля было применено для упрощения

записи информации в ячейках MRAM, также на основе МЭ-композитов создают и полностью МЭ-ячейки памяти, запись и считывание информации в которых требует в 10^4 раз меньше энергии, чем в памяти STT-MRAM [2]. Малое энергопотребление МЭ-структур перспективно и для логических устройств. Уже доказана возможность создания элемента И-НЕ с быстродействием 2 нс и энергопотреблением 5 адж/бит на основе системы МС-частиц на ПЭ-подложке [2]. Также МЭ-композиты могут использоваться в качестве управляемых ретрансляторов спиновых волн в магнонных схемах [3].

Для успешной работы МЭ-устройств материалы, из которых они изготовлены, должны удовлетворять ряду требований. МС-материалы должны иметь высокий пьезомагнитный модуль в околонулевых магнитных полях, что возможно в аморфных магнитных сплавах, например, в метглассе. В роли ПЭ-материалов чаще всего выступает пьезокерамика ЦТС, отличающаяся дешевой и высокими значениями пьезомодуля. Однако ПЭ-материалы для МЭ-устройств микроэлектроники, должны обладать также высокой температурной стабильностью характеристик и добротностью акустического резонанса, которых нет у керамик. Таким требованиям удовлетворяют ПЭ-монокристаллы: $\text{La}_3\text{Ga}_{3,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$ (лангатат), LiNbO_3 , LiTaO_3 , $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (лангасит) и т. д.

Авторами данной работы было измерены МЭ-характеристики композитной гетероструктуры метглас/лангатат/метглас (рис. 2а) от частоты и амплитуды переменного магнитного поля, а также от величины постоянного магнитного поля.

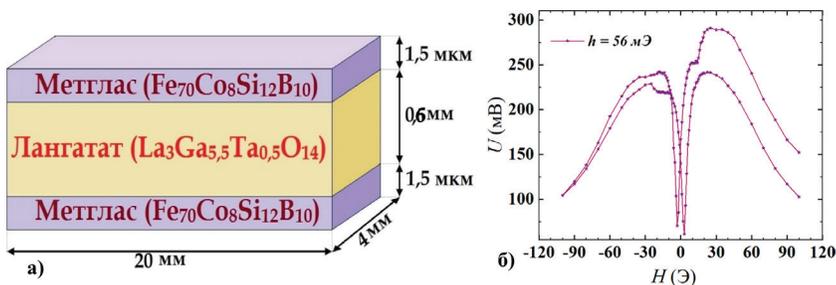


Рис. 2. (а) Исследуемый образец и (б) зависимость напряжения U от поля H при $h = 56$ мЭ и $f = 106,95$ кГц

На рис. 2б показана зависимость выходного МЭ-напряжения структуры на частоте резонанса и от постоянного магнитного поля H . Видно, что в диапазоне полей до 15 Э характеристика линейна и хорошо подходит для измерения приложенного магнитного поля. На графике также наблюдается гистерезис с коэрцитивным полем $H_c \approx 3$ Э при смене направления магнитного поля.

Таким образом, в работе было показано, что МЭ-композиты могут стать основой будущей электронно-компонентной базы при производстве высокочувствительных датчиков переменных и постоянных магнитных полей.

Литература

1. Ситников А. В., Калинин Ю. Е., Жилова О. В. Новые направления физики конденсированного состояния. — Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГТУ», 2021. — 117 с.

2. Бухараев А. А., Звездин А. К., Пятаков А. П., Фетисов Ю. К. Стрейнтроника — новое направление микро- и нанoeлектроники и науки о материалах // УФН, 2018. — Т. 188. — № 12 — С. 1288–1330.
3. Борисенко В. Е., Данилюк А. Л., Мигас Д. Б. Спинтроника. — М.: Лаборатория знаний, 2017. — 229 с.

УДК 538.91

Оптические, электрические и магнитные свойства карбида кремния с кремниевыми вакансиями**Кукушкин С. А., Осипов А. В.***Институт проблем машиноведения РАН**199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. ВО, 61**andrey.v.osipov@gmail.com*

Методом согласованного замещения атомов выращены слои SiC, содержащие кремниевые вакансии. Кремниевые вакансии создаются за счет химической реакции Si с CO. Показано, что если Si был n-типа, то вакансии заряжаются отрицательно и притягиваются друг к другу в направлении $\langle 1\bar{1}0 \rangle$, образуя вакансионные нити.

Ключевые слова: карбид кремния; метод функционала плотности; вакансионные нити.

В настоящей работе экспериментально реализован новый метод получения карбида кремния кубического политипа 3C-SiC с кремниевыми вакансиями в стабильном состоянии [1]. Идея метода состоит в том, что вначале кремниевые вакансии создаются высоко-температурным отжигом в подложке кремния Si(111), легированного фосфором, и лишь затем этот кремний превращается в 3C-SiC(111) за счет химической реакции с монооксидом углерода CO. Часть кремниевых вакансий, пройдя «химический отбор» при этом превращении, попадает в SiC. В результате образуется карбид кремния кубического политипа 3C-SiC с кремниевыми вакансиями V_{Si} [1]. Так как кремний был легирован фосфором, то вакансии приобретают отрицательный заряд. Квантовомеханические расчеты, выполненные методом функционала плотности, показывают, что помимо заряда кремниевые вакансии обладают еще сильным магнитным моментом за счет того, что соседние атомы углерода имеют неспаренные электроны. Ключевую роль в данной системе играет то, что кремниевые вакансии V_{Si} очень сильно взаимодействуют друг с другом. Данное взаимодействие полностью определяет не только оптические, но и электрические свойства данного спинтронного материала. Кажется, что отрицательно заряженные вакансии должны отталкиваться друг от друга за счет кулоновского взаимодействия. Но на самом деле все наоборот. Квантовомеханические расчеты, выполненные методом функционала плотности, показывают, что каждая вакансия создает вокруг себя упругое поле за счет оборванных связей Si-C и эти поля приводят к сильному притяжению кремниевых вакансий вдоль направления $\langle 1\bar{1}0 \rangle$, (см. рис. 1). Притяжение возникает за счет образования новых очень выгодных связей C-C (рис. 1). В результате все вакансии выстраиваются в «нити» $\langle 1\bar{1}0 \rangle$, вдоль которых идет спиновый ток, т.е. ток электронов с одинаковым спином. Изучены оптические и электрические свойства данного материала и проведено сравнение с экспериментальными данными. Показано, что уменьшение длины растянутых C-C связей и уменьшение магнитного момента при локализации электрона ответственны за отрицательную корреляционную энергию электронов, локализованных на месте вакансий (negative-U), т.е. когда локализация очередного электрона выгоднее, чем предыдущего, несмотря на кулоновское отталкивание. На этом свойстве основана работа излучателей и приемников терагерцового диапазона [2].

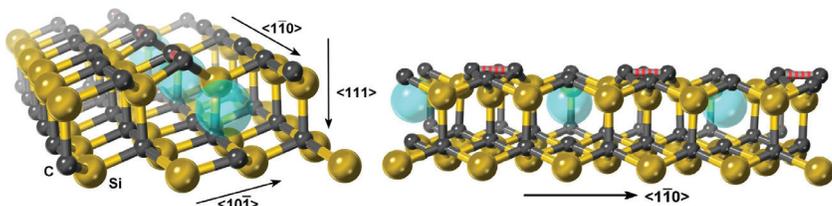


Рис. 1. «Нити» кремниевых вакансий в 3C-SiC согласно квантовомеханическим расчетам.
Новые С-С связи помечены красными кольцами

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ (грант №23-91-01001).

Литература

1. Kukushkin S. A., Osipov A. V. Spin Polarization and Magnetic Moment in Silicon Carbide Grown by the Method of Coordinated Substitution of Atoms // Materials, 2021. Vol. 14. P. 5579. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14195579>.
2. Баграев Н. Т., Кукушкин С. А., Осипов А. В., Клячкин Л. Е., Маляренко А. М., Хромов В. С. Терагерцовое излучение из наноструктур карбида кремния // ФТП, 2021. — Т. 55. — № 11. — С. 1027–1033. — URL: <https://doi.org/10.21883/FTF.2021.11.51556.9709>.

УДК 548.522

Применение методов искусственного интеллекта для оптимизации эпитаксиальных процессов

К. ф.-м. н. Редьков А. В.¹, Троценко Д. И.²

¹ Институт Проблем Машиноведения РАН
199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 61
avredkov@gmail.com

² Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А

Разработан новый подход для описания эпитаксиальных процессов кристаллов и тонких пленок на больших масштабах с атомистической точностью. Подход основан на больших данных, полученных численно или экспериментально. С использованием подхода проанализирован рост кристаллов Косселя и тонких пленок карбида кремния на кремнии (SiC/Si).

Ключевые слова: эпитаксия; тонкие пленки; гетероструктуры; машинное обучение; кристалл Косселя; SiC.

Одна из ключевых проблем микроэлектронной индустрии связана со сложностью разработки технологии синтеза перспективных кристаллов и тонких пленок, а также промышленного ростового оборудования, поскольку для этого необходимо проводить многочисленные эксперименты по определению материальных констант, оптимальных условий для получения кристалла с нужной кристаллической структурой, дефектностью, однородностью, и чистотой от примесей. Вместе с тем, растущие вычислительные мощности и появляющиеся алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта позволяют перенести эту задачу целиком в цифровую форму *in silico* — от предсказания структуры материала с заданными свойствами [1], и до проектирования и оптимизации конструкции реактора, в котором кристалл с такой структурой можно вырастить в промышленных объемах [2].

В докладе описывается новый подход, основанный на больших данных, который позволяет связать атомистические масштабы эпитаксиального процесса с макроскопическими параметрами в реакторе с учетом всех возможных сопутствующих кинетических явлений и неустойчивостей. Для генерации больших данных используется атомистическое GPU-моделирование ростового процесса, которое позволяет определить, в каком режиме протекает рост при тех или иных условиях, какую морфологию и свойства имеет растущий кристалл. После генерации данных к ним применяются различные методы машинного обучения для обработки и обобщения полученных численно результатов и выявления основных зависимостей.

Подход применен к описанию роста кубического кристалла Косселя, и продемонстрированы его преимущества. По сравнению с классическими методами моделирования (в том числе Монте-Карло), подход позволяет делать оценку всех ростовых параметров на 3–4 порядка быстрее, чем непосредственные вычисления. Кроме того, подход применен к росту карбида кремния на кремнии [3] (SiC/Si) и построены предсказательные модели для свойств тонкой пленки, выращенной при тех или иных ростовых условиях.

Работа поддержана грантом РФФ (№ 23-91-01001).

Литература

1. Oganov A. R., Glass C. W. Crystal structure prediction using ab initio evolutionary techniques: Principles and applications // The Journal of chemical physics, 2006. Vol. 124. № 24.
2. Kukushkin K., Ryabov Y., Borovkov A. Digital twins: a systematic literature review based on data analysis and topic modeling // Data, 2022. Vol. 7. № 12. P. 173.
3. Kukushkin S. A., Osipov A. V. Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films // Journal of Physics D: Applied Physics, 2014. Vol. 47. № 31. P. 313001.

УДК 544.227; 544.08.

Совершенствование методики селективного травления пластин арсенида галлия

Вербицкий Р. А., Сыров Ю. В., к. ф.-м. н., Князев С. Н., к. т. н.,
Ползикова К. С., Латонов В. Д.

АО «Гиредмет» имени Н. П. Сажина

111524, г. Москва, ул. Электродная, 2, стр. 1

RAVerbitsky@rosatom.ru

В работе продемонстрированы результаты последовательного применения селективного и полирующего травителей, используемых для плоскости {100} пластин монокристаллического арсенида галлия, для оценки плотности дислокационных ямок травления с использованием технологии машинного зрения.

Ключевые слова: арсенид галлия; плотность дислокаций; машинное зрение; полирующий травитель; травление арсенида галлия; структурные дефекты.

Одним из этапов технологии производства монокристаллического арсенида галлия методом ЛЕС является контроль структурных дефектов получаемого сликта. К критически важным дефектам, с точки зрения дальнейшего применения материала, относятся дислокации — линейные дефекты структуры, возникающие в процессе роста монокристалла [1]. Существуют различные методы, позволяющие выявить наличие дислокаций и дать им количественную оценку [2]. Но большинство из этих методов, например, рентгеновская топография, просвечивающая электронная микроскопия, растровая электронная и атомно-силовая микроскопия, являются трудоемкими и требуют специального и дорогостоящего оборудования. Куда более привлекательным, с точки зрения оперативного технологического контроля пластин GaAs, является метод селективного (избирательного) травления, который состоит из нескольких этапов и заключается в избирательном химическом взаимодействии плоскости {100} пластины монокристаллического GaAs с травителем и дальнейшем подсчете ямок травления для определения плотности дислокаций (etching pits density — EPD [см^{-2}]). Обычно, в качестве селективного травителя, применяют расплав кристаллогидрата гидроксида калия $\text{KOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ [3]. Подсчет ямок травления производится либо визуально — по выбранным полям на поверхности пластины и усреднением полученного результата, либо с использованием автоматизированных средств на основе технологий машинного зрения [4].

Типичная картина результатов селективного травления показана на рис. 1. Отчетливо видны дислокационные ямки травления, проявленные на плоскости {100} монокристаллического GaAs.

Сложность подсчета дислокационных ямок травления обусловлена их наложением друг на друга с образованием скоплений, в которых довольно затруднительно идентифицировать отдельные ямки, что приводит к неточности результата оценки плотности дислокаций.

Авторами настоящей работы был предложен способ усовершенствования методики селективного травления, который позволяет разделить ямки травления в скоплениях, что позволило упростить их подсчет и повысить точность оценки

величины EPD. Способ заключается в дополнительной химической обработке пластины составом не избирательного травителя, который растворяет поверхность пластины в кристаллографическом направлении (100) на несколько микрон, в следствии чего появляются границы между «слипшимися» ямками травления. Образование четких границ дает возможность идентифицировать отдельные ямки травления, что упрощает их подсчет как визуально, так и с применением автоматизированных средств.



Рис. 1. Дислокационные ямки травления на плоскости {100} пластины GaAs

На рис. 2 представлен участок пластины GaAs после селективного травления и тот же участок после дополнительной химической обработки в полирующем травителе. После дополнительной обработки отчетливо видны проявившиеся границы между ямками травления, что способствует наиболее точной их детекции и подсчету.

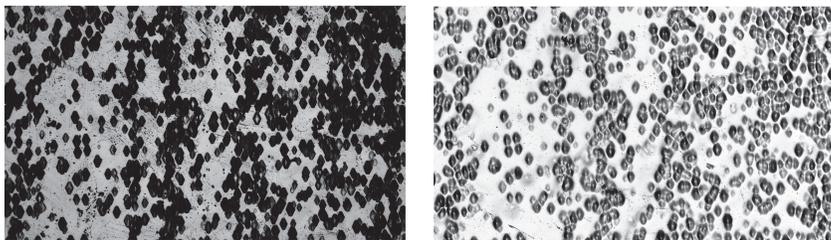


Рис. 2. Результат обработки пластины в селективном травителе (слева) и после дополнительной химической обработки в не селективном травителе (справа)

На рис. 3 представлен результат детекции ямок травления тех же участков пластины с применением АСПД «Колибри» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615712).

В результате применения дополнительной химической обработки полирующим травителем, точность детекции ямок травления, а соответственно точность оценки плотности дислокаций, с применением АСПД «Колибри» повысилась на 15 %. Это говорит о целесообразности предложенного авторами способа, что позволит в дальнейшем с большей достоверностью оценивать количественные характеристики дислокационной структуры монокристаллического арсенида галлия.

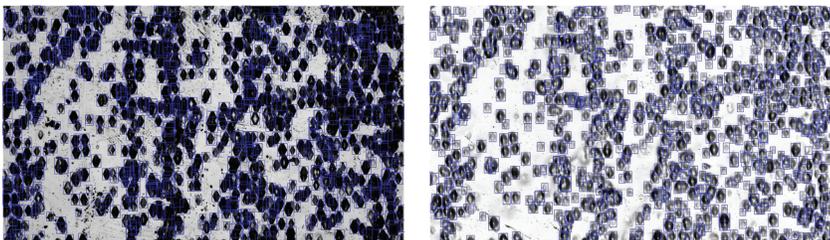


Рис. 3. Результаты детекции в АСПД «Колибри» без дополнительной обработки пластины в полирующем травителе (слева) и после дополнительной обработки в полирующем травителе (справа)

Литература

1. Марков А. В., Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. О роли дислокаций в формировании свойств монокристаллов полупроводящего GaAs // Физика и техника полупроводников, 1986. — Т. 20. — № 4. — С. 634.
2. Князев С. Н., Кудря А. В., Комаровский Н. Ю. и др. Методы исследования дислокационной структуры полупроводниковых монокристаллов группы $A^{II}B^V$ // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 2022. — Т. 25. — № 4. — С. 323–336. DOI: 10.17073/1609-3577-2022-4-323-336. EDN TEZNPS.
3. Вербицкий Р. А., Ползикова К. С., Сыров Ю. В. Особенности выявления выходов дислокаций на поверхности пластин GaAs // 3-я Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», посвященная памяти академика Н. П. Сажина (РедМет-2024): Сборник тезисов. Москва, 3–5 апреля 2024 г. — Москва: АО «Гиредмет» им. Н. П. Сажина, 2024. — С. 259–260.
4. Вербицкий Р. А., Сыров Ю. В., Князев С. Н., Латонов В. Д. Применение машинного зрения для детекции и подсчета выходов дислокаций на поверхности пластин арсенида галлия // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: Сборник трудов Национальной научно-практической конференции, Москва, 07–08 декабря 2023 года. — Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. профессора Н. Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА им. профессора Н. Е. Жуковского, 2023. — С. 139–143. EDN FQMPV1.

УДК 544.2

Исследование тонких пленок никеля, полученных методом атомно-слоевого осаждения, для применений в электронике

Якушев В. А.^{1,2}, Вишневский А. С.¹, Воротилов К. А.¹

¹ МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

² АО «НПП «Пульсар»
105187, г. Москва, Окружной проезд, 27
techcenter@mirea.ru

Тонкие пленки никеля привлекают все большее влияние исследователей в связи с перспективами его использования в процессах создания многоуровневых систем металлизации, датчиков и устройств, основанных на его ферромагнитных свойствах и магнитоstriction [1]. Основным методом осаждения пленок Ni является метод напыления в вакууме, который, однако, обладает существенными ограничениями при осаждении на рельефы с развитой поверхностью. Последнее десятилетие все большее распространение в электронике получает метод атомно-слоевого осаждения (АСО), основанный на самоограниченных реакциях, реализуемых чередованием подачи прекурсоров. Такой принцип приводит к росту одного монослоя вещества за один цикл и обеспечивает уникальную возможность конформного осаждения на рельефы любой конфигурации, что является критически важным в современном микроэлектронном производстве. Однако, практическая реализация данного метода всегда осложняется сложностью химических процессов на поверхности и требует проведения исследований для каждого соединения и используемых прекурсоров. Целью настоящей работы являлось исследование АСО пленок Ni с использованием ацетилацетоната никеля (II) (Ni(acac)₂) и метанол, в качестве прекурсоров.

Тонкие пленки Ni осаждали на подложки Si и Si-SiO₂. Осаждение производили в реакторе (300 °C) установки Veeco TFS 200. Ni(acac)₂ нагревали до 190 °C. Из-за недостаточного давления пара нагретого Ni(acac)₂ использовали газ-носитель N₂ (300 см³/мин). Полученные пленки Ni толщиной ~60 нм были отожжены в вакууме и на воздухе при температурах 800–850 °C. Свойства пленок Ni были исследованы методами спектральной эллипсометрии, ЭДС, ИК-спектроскопии, РФА, вибромагнитометрии, АСМ и МСМ.

Эллипсометрия, помимо данных о толщине, показала, что отожженные на воздухе пленки Ni хорошо коррелируют с литературными данными $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ при $\lambda = 632,8$ нм, равные 1,838 и 0,064 соответственно. С помощью ЭДС и ИК-спектроскопии определили примесный состав пленок (С, О). Оба метода фиксируют значительное уменьшение углеродных связей после отжига, свидетельствующее о том, что С преимущественно находится на поверхности пленки никеля. Поскольку метод ЭДС не позволяет идентифицировать к какому соединению относится элемент О Ка, это затрудняет примесный анализ образцов. Таким образом, метод ИКФС является более предпочтительным для исследования химической структуры тонких пленок никеля за счет оценки колебательных связей Ni-O и C = O на 400 см⁻¹ и ~1570 см⁻¹ соответственно. Согласно РФА отжиг исходной пленки в вакууме приводит к усилению интенсивности пика металлической фазы Ni

на $2\Theta \approx 45^\circ$. Проведенный эксперимент и полученный результат отсутствуют у других исследователей. При этом Si без подслоя SiO_2 не способствует формированию кристаллической структуры, что также не было исследовано другими научными группами. Магнитные свойства были изучены при помощи вибромагнитометра, а также МСМ. Полученные изображения при помощи МСМ являются уникальными, так как они не опубликованы в литературе на данный момент времени. Исходная пленка демонстрирует ферромагнитный порядок. Отжиг в вакууме приводит к увеличению магнитных доменов, увеличивая значения остаточной намагниченности, а также коэрцитивной силы. Полученная зависимость не представлена в литературе и открывает новые возможности использования тонких пленок Ni в магнитоэлектронике. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования метода АСО для создания тонких пленок Ni.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП РТУ МИРЭА (РФА)
при поддержке РФФ (грант №23-79-30016).*

Литература

1. Liang X. // Sensors, 2020. 20, 1532.

УДК 62-416

Исследование структуры монокристаллического алмаза, выращенного методом CVD, в зависимости от продолжительности роста

Балинов Д. А.¹, Кан В. Е.^{1,2}, Кириченко А. Н.³, Родионов Н. Б.³

¹ ООО «ФРЕЗАРТ СВД»

117587, г. Москва, ул. Днепропетровская, 2, оф. 514

d.balinov@frezart.ru

² ОНЦ СО РАН

644024, г. Омск, пр. К. Маркса, 15

³ Частное учреждение «ИТЭР-Центр»

123060, г. Москва, ул. Расплетина, 11, корп. 2

v.kan@frezart.ru

В работе представлены результаты исследования структуры и состава объемного монокристаллического алмаза, полученного в результате длительного цикла роста методом CVD (более 100 часов). Изучено накопление внутренних напряжений и распределение примесей в зависимости от удаленности от материнской подложки в исходном материале.

Ключевые слова: монокристаллический алмаз; синтез; микроэлектроника; газофазный синтез; кристаллы электронного качества; фотолюминесценция; примеси; рамановская спектроскопия; УФ-спектроскопия.

Благодаря уникальному сочетанию рекордных характеристик; монокристаллический алмаз находит все больше сфер применения в микроэлектронике; оптике и детекторной технике [1]. Как показывают исследования; структурное совершенство материала оказывает решающее значение на работоспособность конечных приборов. В работе представлены результаты исследования структуры и свойств подложек из монокристаллического алмаза; изготовленных из единого объемного кристалла; с отнесением полученных результатов к продолжительности роста и удаленностью от материнской подложки.

Внутренние напряжения в кристаллической решетке изучены методом комбинационного рассеяния света, распределение примесей и дефектов структуры исследовалось методом спектроскопии фотолюминесценции и путем фиксации фотолюминесцентных изображений на камеру.

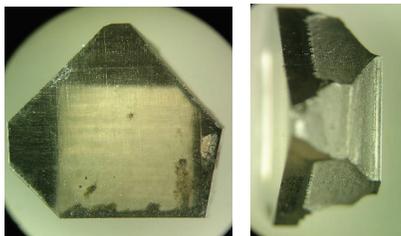


Рис. 1. Изображения объемного слитка алмаза, выращенного методом CVD

Литература

1. Кан В. Е., Теплова Т. Б., Худолей А. Л., Артёмов Е. А., Мантузов А. В., Зарезов М. А. Современные методы плирования пластин из монокристаллического алмаза для изделий микроэлектроники // Сборник тезисов Российского форума «Микроэлектроника 2023». — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. — С. 749.

УДК 621.3.049

Современное состояние технологий выращивания и обработки полупроводниковых соединений группы $A^{III}B^V$

Нестюркин М. С.^{1,2}, Козлов Р. Ю.^{1,2}, Комаровский Н. Ю.^{1,2}, к. т. н.,
Молодцова Е. В.¹, к. т. н., Трофимов С. С.¹

¹ АО «Гиредмет» имени Н. П. Сажина
111524, г. Москва, ул. Электродная, 2, стр. 1
mnestyurkin@mail.com

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Разработана полная производственная линия по выращиванию и обработке монокристаллов группы $A^{III}B^V$ (InSb, InAs, GaAs, GaSb). Выращены монокристаллы в направлении (100) и диаметром до 100 мм. Получены полированные пластины, поверхностные характеристики которых соответствуют мировым стандартам качества. Данные пластины опробованы в приборных разработках.

Ключевые слова: монокристаллы; соединения $A^{III}B^V$; метод Чохральского; полированные пластины.

Полупроводниковые соединения группы $A^{III}B^V$ являются основной компонентной базой для изделий фото и микроэлектроники. АО «Гиредмет» является единственной в России организацией, осуществляющей выращивание монокристаллов соединений $A^{III}B^V$. Поскольку в настоящее время окончательной продукцией для заказчика являются полированные пластины, в АО «Гиредмет» ведутся работы по созданию технологической линии по обработке кристаллов до получения полированных пластин. В настоящее время нами получены монокристаллы InSb, InAs, GaAs, GaSb диаметром 2 дюйма, 3 дюйма и 100 мм [1]. Несмотря на то, что получаемые материалы принадлежат одной группе $A^{III}B^V$, при их обработке следует учитывать механические, структурные и электрофизические свойства (легированный или нелегированный материал). Технология механической обработки включает в себя несколько ключевых этапов, а именно: многопроволочная резка, шлифование и полирование. На каждом из технологических этапов учитываются перечисленные выше свойства каждого из материалов. Установлено, что на этапе проволочной резки скорости подачи рабочего стола различаются, уменьшаясь от высокотемпературных к низкотемпературным материалам [2]. При этом вязкость абразивной суспензии также уменьшается для антимоноидов. На стадии шлифовки обнаружено, что для получения требуемой шероховатости необходимо применять разные давления рабочих столов для различных соединений. Показано, что на стадии полирования наиболее важным является баланс между физическими и химическими воздействиями на поверхность пластины. При этом для каждого соединения $A^{III}B^V$ подобраны определенные соотношения химических компонентов. Установлено, что на данный момент финишная отмычка является лимитирующей стадией технологии получения полированных пластин.

Литература

1. Комаровский Н. Ю. и др. Исследование монокристаллов антимонида индия, полученных модернизированным методом Чохральского в различных кристаллографических направлениях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2023. — № 89 (8). — С. 38–46. — URL: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-8-38-46>.
2. Подгорный Д. А., Нестюркин М. С. и др. Влияние технологических параметров при многопроволочной резке слитков GaAs на поверхностные характеристики пластин. Известия высших учебных заведений // Материалы электронной техники, 2023. — № 26 (2). — С. 101–109. — URL: <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-2-101-109>. EDN: PMDJIV.

УДК 621.382.3

Экспериментальное исследование активных и пассивных элементов на основе гетероструктур $A^{III}B^V$ для СВЧ МИС МШУ X-, Ku-диапазона

Цуваза Д., д. т. н. Каргин Н. И., к. т. н. Рыжук Р. В., д. ф.-м. н.

Васильевский И. С., Клоков В. А., к. т. н. Захарченко Р. В.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

tsdamir321@gmail.com

Представлены экспериментальные результаты исследования активных и пассивных компонентов для СВЧ МИС. Исследованы характеристики пассивных компонентов при температурах до 125 °С. На основе полученных данных предложены модели элементов для библиотеки САПР AWR DE. Проведена верификация моделей, погрешность моделирования не превышает 10 процентов.

Ключевые слова: СВЧ диапазон; монолитные интегральные схемы; САПР; библиотеки элементов.

В наши дни для повышения эффективности функционирования электронных устройств широко применяются монолитные интегральные схемы (МИС), которые состоят из большого количества активных и пассивных компонентов. Для разработки таких схем применяются современные программные пакеты САПР, в которых элементы представлены в виде моделей. Набор таких моделей, т. е. библиотека элементов, значительно расширяет возможности для качественного проектирования электронных устройств, так как позволяет провести полноценную симуляцию работы прибора в различных режимах эксплуатации.

Для их построения требуется проведение комплексного исследования статических и частотных свойств тестовых структур (дискретные транзисторы, пассивные компоненты), позволяющее получить параметрические масштабируемые модели. Повышение точности создания моделей указанных компонент во многом упрощает процедуру разработки последующих иерархических систем на их основе.

В качестве экспериментальных образцов использовались рНЕМТ-транзисторы на основе гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs с четырьмя затворными секциями шириной 50 мкм и длиной канала 0,15 мкм, SiN_x МДМ-конденсаторы, планарные катушки индуктивности и TaN тонкопленочные резисторы, изготовленные в Центре радифотоники и СВЧ технологий НИЯУ МИФИ [1]. Измерительный стенд состоял из векторного анализатора цепей PNA-X, импульсного источника питания AMCAD PIV, зондовых станций Cascade Microtech PM8 и MPI TS200-IFE (для температурных исследований).

Измерения характеристик рНЕМТ-транзистора проводились в частотном диапазоне 5–45 ГГц при напряжении питания до 6 В и напряжении смещения от –0,3 до 1,0 В. Исследование характеристик пассивных компонентов проводилось в температурном диапазоне 25–125 °С с шагом 25 °С при частотах до 50 ГГц и мощности СВЧ-сигнала –10 dBm. Контроль параметров конденсатора, резистора и катушки индуктивности осуществлялся путем анализа измеренных параметров импеданса.

Граничные частоты усиления по току и по мощности были определены путем стандартных экстраполяций частотных зависимостей $|h_{21}|$ и коэффициента Масона к более высоким частотам и составили значения $f_t = 75$ ГГц и $f_{\max} = 103$ ГГц соответственно [2].

Показано, что определяющим фактором при создании нелинейной модели транзистора является учет емкости затвор-контакт и сток-контакт. Остальные составляющие транзистора влияние оказывают в меньшей степени. Наибольшей схожимостью при описании характеристик разработанного рНЕМТ обладает модель Чалмерса, основанная на параметрическом анализе. Предложенные модели позволяют достаточно удовлетворительно описать характеристики исследуемых компонентов СВЧ МИС в диапазоне рабочих напряжений и частот. Погрешность моделирования не превышает 10%.

Установлено, что увеличение температуры значительно влияет на характеристики электронных компонентов, что по всей видимости связано с температурной зависимостью диэлектрической постоянной. Так, например, емкость конденсатора увеличилась более, чем на 15% при нагреве на 100 °С в частотном диапазоне 10–20 ГГц [3].

Разработанные модели компонентов для СВЧ МИС интегрированы с соответствующими топологиями элементов на пластине и успешно внедрены в локальную библиотеку НИЯУ МИФИ в САПР AWR DE. Результаты исследования температурных характеристик пассивных компонентов легли в основу работы по уточнению моделей для СВЧ МИС, а также способствуют корректировке технологического процесса.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра радиофотоники и СВЧ технологий НИЯУ МИФИ в рамках проекта №FSWU-2023-0088.

Литература

1. Васильевский И. С. и др. Разработка отечественного техпроцесса 0,15 мкм рНЕМТ для МИС СВЧ МШУ // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. — Омск, 2022. — С. 75–83.
2. Цунваза Д. и др. Разработка нелинейной модели псевдоморфного 0,15 мкм рНЕМТ AlGaAs/InGaAs/GaAs транзистора // Микроэлектроника, 2023. — Т. 52. — № 3. — С. 200–206. DOI: 10.31857/S0544126923700357.
3. Цунваза Д. и др. Исследование температурных характеристик пассивных элементов на основе гетероструктуры соединений АІІАs // Мокеровские чтения: Сборник трудов. — Москва: НИЯУ «МИФИ», 2024. — С. 49–50.

УДК 538.91

Наномасштабный карбид кремния на кремнии для микро- и оптоэлектроники

Кукушкин С. А., Осипов А. В.

Институт проблем машиноведения РАН

199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 61

sergey.a.kukushkin_s@gmail.com

В докладе излагаются основные принципы нового метода роста эпитаксиальных, низкодефектных пленок SiC на Si. Метод основан на открытии нового механизма релаксации упругих механических напряжений при росте эпитаксиальных пленок за счет предварительного внедрения в решетку подложки ансамбля нанообъектов, состоящих из притягивающихся центров дилатации — атома углерода в межузельной позиции кремния и кремниевой вакансии. На основании данной технологии в настоящее время начато производство небольших партий пластин карбида кремния на кремнии диаметром 2, 3, 4 и 6 дюймов. Показано, что полученные подложки 3C-SiC/Si являются прекрасным буфером для роста эпитаксиальных слоев AlN GaN.

Ключевые слова: 3C-SiC на Si; AlN; GaN; наноструктуры; транзисторы; миро-LED.

В докладе излагаются основные принципы нового метода роста эпитаксиальных пленок SiC на Si; основанного на согласованном замещении части атомов кремния в кристаллической решетке Si на атомы углерода [1–5]. Метод основан на открытии нового механизма релаксации упругих механических напряжений при росте эпитаксиальных пленок за счет предварительного внедрения в решетку подложки ансамбля нанообъектов—дилатационных диполей — устойчивых комплексов; состоящих из притягивающихся центров дилатации — атома углерода в межузельной позиции кремния и кремниевой вакансии. По сути дела; впервые в мировой практике реализован метод согласованной замены атомов одного сорта другими прямо внутри исходного кристалла без разрушения его кристаллической структуры. Метод напоминает «генетический синтез» белковых структур в биологии. Метод позволяет решить одну из основных проблем гетероэпитаксии; а именно; осуществить синтез низкодефектных; ненапряженных эпитаксиальных пленок при большом различии между параметрами решетки пленки и подложки [1–5]. Качество структуры слоев; полученных данным методом; значительно превосходит качество пленок карбида кремния; выращенных на кремниевых подложках ведущими мировыми компаниями. Открытие данного метода позволяет прямо на кремниевой подложке синтезировать широкий спектр широкозонных материалов; что открывает беспрецедентные условия для создания нового типа приборов. Приведено сравнение нового метода роста с классическими методами роста тонких пленок. Изложен термодинамический и кинетический анализ процесса замещения атомов в твердой фазе [1–5].

Инновационный потенциал данной технологии состоит в его основной технологической составляющей — новой прорывной технологии выращивания буферного слоя карбида кремния на кремнии, на основе которого и будут формироваться слои других широкозонных полупроводников на кремнии.

В настоящее время: начато производство небольших партий пластин карбида кремния на кремнии диаметром 2, 3, 4 и 6 дюймов; начаты продажи небольших партий пластин карбида кремния диаметром 4 дюйма; разработана технология создания светодиодных чипов для миро-LED и созданы первые, промышленного качества образцы микро-светодиодов на пластинах карбида кремния на кремнии; изготовлены первые в мире опытные образцы микрочипов, для микро-светодиодов (Micro LED) толщиной порядка 5–20 мкм на основе гетероструктуры AlInGaN/GaN, сформированной на Si с буферным слоем наномасштабного SiC; разработаны и созданы терагерцовые приемники и излучали на подложках SiC/Si; разрабатывается технология создания датчиков ультрафиолетового диапазона с длиной волны менее 320 нм на подложке нового типа — карбид кремния на кремнии; разработана технология создания на подложках SiC/Si пиро и пьезодатчиков с пьезокоэффициентом $12 \mu\text{C}/(\text{m}^2\text{K})$ со слоем AlN и $18 \mu\text{C}/(\text{m}^2\text{K})$ со слоем AlGaIn, что на сегодняшний день в три раза превышает подобные коэффициенты известных материалов, изготовленных на основе AlN.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда
РНФ №23-91-01001.*

Литература

1. Kukushkin S. A., Osipov A. V. // J. of Phys. D: Appl. Physics, 2014. Vol. 47. 313001–313041.
2. Kukushkin S. A. and Osipov A. V. // Materials, 2021. Vol. 14. P. 78–90.
3. Kukushkin S. A. and Osipov A. V. // Materials, 2021. Vol. 14. P. 5579–5593.
4. Кукушкин С. А., Осипов А. В. // Журнал общей химии, 2022. — Т. 92. — № 4. — С. 547–577.
5. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Конденсированные среды и межфазные границы, 2022. — Т. 24. — № 4. — С. 407–458.

УДК 53.087.04: 621.793.1: 546.1/681

Специальные подложки кубического карбида кремния на кремнии (3C-SiC/Si) для роста транзисторных гетероструктур Ga(Al)N

Федотов С. Д.¹, Гращенко А. С.², Редьков А. В.², Кукушкин С. А.², Царик К. А.³, Стаценко В. Н.¹

¹ АО «Эпиэл»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2
fedotov@epiel.ru

² Институт проблем машиноведения РАН

199178, г. Санкт-Петербург, В.О. Большой пр., 61
avredkov@gmail.com

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
tsarik_kostya@mail.ru

В докладе показаны актуальные результаты разработки опытной технологии управляемого синтеза наноразмерных эпитаксиальных слоев карбида кремния кубического политипа (3C-SiC) на подложках и сверхвысокоомных структурах монокристаллического кремния. Показаны первые результаты использования данных специальных подложек 3C-SiC/Si для роста транзисторных гетероструктур Ga(Al)N с высокой подвижностью носителей заряда (HEMT), полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Ключевые слова: газофазная эпитаксия; ГФЭ; молекулярно-лучевая эпитаксия; МЛЭ; III-N; нитрид галлия; GaN; карбид кремния; SiC; 3C-SiC; транзисторы; HEMT; кремний; Si.

Технология транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе GaN на кремнии [1–3] в последние десятилетия демонстрирует значительный прогресс, и находит применения в области силовой электроники и высокочастотных приложений, в том числе в телекоммуникационных системах 5G и космической связи. Этот прогресс обусловлен, в первую очередь, совершенствованием эпитаксиальных методов выращивания GaN на кремниевых подложках, что позволило снизить плотность дефектов и упругие напряжения в гетероструктурах [4], а также разработкой новых конструкций затворов и барьерных слоев, обеспечивающих более эффективное управление каналом, уменьшение потерь, и стойкость к пробоям [1–3]. Кроме того, наблюдается значительное снижение себестоимости производства, что делает GaN-on-Si HEMT технологию конкурентоспособной по отношению к традиционным решениям.

Вместе с тем, несмотря на уже достигнутые результаты, для широкого внедрения HEMT решений на основе GaN на кремнии, необходимо дальнейшее совершенствование ростовой технологии. Одним из перспективных направлений является использование буферного слоя карбида кремния кубического политипа (3C-SiC) [5–8], предварительно нанесенного на кремний. Такие подложки обеспечивают лучшее согласование по параметру решетки и коэффициенту термического расширения с III-нитридами, что позволяет существенно снизить возникающие

при росте и охлаждении упругие напряжения. Кроме того, в отличие от подложек чистого кремния, они не подвержены воздействию металлов III группы и активного азота в процессе синтеза, что также оказывает значительное влияние на качество выращенных слоев III-N.

В настоящем докладе приведены результаты по разработке ростовой технологии отечественных специальных подложек 3C-SiC/Si [7–8], синтезированных методом замещения атомов на подложках как обычного, так и высокоомного кремния, а также их применению для синтеза НЕМТ-гетероструктур на основе нитрида галлия.

В процессе синтеза пленка SiC, в отличие от традиционных методов [5–6], нарастает не сверху, а формируется непосредственно в приповерхностном слое кремния в результате твердотельной химической реакции, что обуславливает существенные отличия от подложек 3C-SiC/Si, выращенных иными методами. Проведена серия экспериментов по росту SiC/Si при варьируемых условиях, включая время и температуру синтеза. Синтезированные образцы всесторонне исследованы различными методами, включая эллипсометрию, профилометрию, электронографию, СЭМ и ПЭМ, исследована их кривизна. Построены теоретические модели всех процессов, происходящих в процессе трансформации приповерхностного слоя Si в карбид кремния. Установлено время синтеза и определены временные интервалы синтеза, начиная с которого и в течение которого, на поверхности эпитаксиального слоя SiC/Si преобладают Si- либо C-атомы. К настоящему моменту с использованием спец-подложек SiC/Si диаметром до 4 дюймов проведены эксперименты по синтезу GaN-НЕМТ гетероструктур на установке молекулярно-лучевой эпитаксии, результаты которых также освещены в докладе.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ
(проекты 23-91-01001 и 23-91-01006).*

Литература

1. Yacoub H., Fahle D., Finken M., Hahn H., Blumberg C., Prost W., Kalisch H., Heuken M., Vescan A. // *Semicond. Sci. Technol.*, 2014. 29, 115012.
2. Chandrasekar H., Uren M. J., Casbon M. A., Hirshy H., Eblabla A., Elgaid K., Pomeroy J. W., Tasker P. J., Kuball M. // *IEEE Trans. Electron. Devices*, 2019. 66, 1681.
3. Berber F., Johnson D. W., Sundqvist K. M., Piner E. L., Huff G. H., Harris H. R. // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2017. 65, 1465.
4. Cordier Y., Semond F., Massies J., Leroux M., Lorenzini P., Chaix C. // *J. Cryst. Growth* 301/302 (2007) 434.
5. Cordier Y., Portail M., Chenot S., Tottereau O., Zielinski M., Chassagne T. // *J. Cryst. Growth* 310 (2008) 4417.
6. Liaw H. M., Venugopal R., Wan J. and Melloch M. R. // *Solid-State Electron.*, 2001. 45, 1173.
7. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Эпитаксиальный карбид кремния на кремнии. Метод согласованного замещения атомов (Обзор) // *Журнал общей химии*, 2022. — Т. 92. — № 4. — С. 547–577.
8. Kukushkin S., Osipov A., and Redkov A. SiC/Si as a New Platform for Growth of Wide-Bandgap Semiconductors // Chapter 18 in book “Advanced Structured Materials”, 2022. P. 335–367.

УДК 004.3'142

Опыт импортозамещения материалов для производства МКК для ИС. Пути и перспективы решения вопросов по замене импортных материалов

Егошин В. А., Шугаев Ш. Н., Ахметгалиев Р. Ш., Ермолаев Е. В.

АО «Завод полупроводниковых приборов»

424003, РМЭ, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26

vaegoshin@zpp12.ru

Приведен опыт работы по импортозамещению материалов на отечественные для производства МКК для ИС. Выделены важнейшие свойства материалов, отражающиеся на технологии и характеристиках изделий, характерных для НТСС и ЛТСС технологий. Отмечены тенденции и перспективы развития производства МКК с использованием отечественных материалов.

Ключевые слова: импортозамещение; МКК; ИС; керамика; глинозем; НТСС; ЛТСС; ленты 29НК и 42Н.

Проблемы импортозамещения по материалам для электронной техники, используемым в производстве МКК для ИС, остаются на сегодняшний день крайне актуальными.

Актуальность обусловлена необходимостью обеспечения производства МКК для ИС материалами для изготовления керамической платы основания корпуса (глубокопрокаленный глинозем, силиконизированная бумага для литья ленты), материалами для изготовления проводниковых и диэлектрических паст (пасты на основе вольфрамовых, молибденовых порошков с применением этилцеллюлозы и т.д.), материалами для формирования и нанесения топологического рисунка (фоторезист, трафаретные сетки и т.д.), а также к материалами для изготовления металлических комплектующих корпусов (ленты из прецизионных сплавов 29НК и 42Н).

Технологический процесс изготовления МКК крайне сложно поддается декомпозиции и имеет ряд особенностей, таких как необходимость обеспечения совместимости материалов друг с другом, с технологией и оборудованием; небольшой объем используемых материалов и сложность прогнозирования конечного результата без проведения опытных работ и производственного опробования.

Работы по импортозамещению материалов и достижению требуемых эксплуатационных свойств проводились в условиях необходимости обеспечения дальнейшей миниатюризации и повышения функциональности изделий, требующих комбинирования технологических приемов, характерных как для НТСС, так и для ЛТСС технологий. При этом особое внимание было уделено разработке отечественного аналога низкощелочного глубокопрокаленного глинозема зарубежных фирм Almatiss, Nabaltec, и т.д.

Совместно с одним из отечественных предприятий разработан технологический процесс, и организовано промышленное производство глубокопрокаленного низкощелочного глинозема определенного гранулометрического состава с необходимыми значениями коэффициента усадки при высокотемпературном обжиге.

В настоящее время активно решаются технологические вопросы по производству лент из прецизионных сплавов 29НК и 42Н, силиконизированной бумаги для литья керамической ленты (пленки), материалов для изготовления органических связок паст, материалов малотоннажной химии.

На сегодняшний день крайне актуальными являются задачи обеспечения материалами работ по изготовлению изделий, работающих в высокочастотной области. Характеристики изделий, изготовленных по НТСС технологии, практически исчерпали свои возможности, в связи с чем представляется достаточно перспективным увеличение доли многослойных многофункциональных изделий, изготавливаемых с применением технологических методов и приемов из области производства низкотемпературной керамики. Также необходимо отметить, что предварительно проведенные работы показали возможность использования разработанного отечественного глинозема и для ЛТСС технологии.

В ближайшее время планируется комплекс сложных мероприятий по разработке и организации производства отсутствующих отечественных материалов, отвечающих современным тенденциям развития микроэлектроники с использованием стандартов проектирования 50/50/50 (ширина проводника, расстояние между проводниками, диаметр переходных отверстий).

Все это позволит решить также вопрос импортозамещения остро востребованных изделий зарубежного производства и дать новое дыхание развитию отечественной микроэлектроники.

Литература

1. Шугаев Ш. Н., Ермолаев Е. В., Егошин В. А., Ахметгалиев Р. Ш., Мазуренко А. А. Технологическое оборудование и материалы, применяемые для изготовления металлокерамических корпусов // *Электроника НТБ*, 2022. — № 5 (00216). — С. 1–4.
2. Шугаев Ш. Н., Ермолаев Е. В., Егошин В. А. Особенности производства многослойных корпусов с использованием тонких керамических лент // *Электроника НТБ*, 2022. — № 6 (00214). — С. 142–144.

УДК 621.3

Пути функциональной интеграции полупроводниковых приборов благодаря использованию кремниевых структур со сквозными каналами *p*-типа

Скиданов А. А.¹, Царева Е. А.¹, Веневцев С. М.¹, Коновалов А. В.¹,
Середин Б. М.², д. т. н.

¹ АО «ВЗПП-МИКРОН»

394033, Воронежская обл., г. Воронеж, Ленинский просп., 119А

² ЮРГПУ имени М. И. Платова

346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Приведен анализ примеров возможностей интеграции силовых полупроводниковых приборов различного функционального назначения в едином кристалле благодаря использованию кремниевых структур со сквозными каналами *p*-типа (КССК). Показано, что структуры на основе сквозных каналов *p*-типа могут выступать как основа для трехмерной интеграции при изготовлении силовых полупроводниковых приборов. Исходными данными для моделей послужили результаты исследования свойств диодов изготовленных с использованием КССК пластин.

Ключевые слова: термомиграция; кремниевые структуры со сквозными каналами; функциональная интеграция; ограничитель напряжения.

На основе КССК пластин изготовлен кристалл выпрямительного диода, имеющего сквозную изоляцию дрейфовой *N*-области и катодный вывод на верхней стороне кристалла, а анодный вывод на обратной стороне кристалла. Полученный диод продемонстрировал напряжение лавинного пробоя, соответствующее предельному пробивному напряжению для выбранного концентрации примеси ($V_b = 270$ В при $\rho = 4,5$ Ом·см).

Моделирование распределения электрического поля по структуре такого диода показывает общее снижение напряженности в краевых областях и наибольшую напряженность в области плоского *p-n*-перехода, что и объясняет полученный уровень пробивного напряжения, соответствующий теоретически предельному напряжению плоского *p-n*-перехода.

Сквозные каналы *p*-типа с кольцевой топологией могут обеспечивать хорошую изоляцию высоковольтных полупроводниковых приборов, содержащихся в общем кристалле, что позволяет интегрировать мощные высоковольтные приборы вместе с драйверной частью в едином кристалле.

Последовательно вписанные друг в друга кольцевые области позволяют получать кратное увеличение пробивного напряжения области внутреннего кармана относительно области исходной подложки, это позволяет организовывать каскадную изоляцию внутри кристалла

Высокая концентрация акцепторной примеси ($N_d > 10^{19}$) позволяет использовать точечные сквозные области *p*-типа для переноса контактов с лицевой на обратную сторону пластины (либо наоборот). Например, при размещении тиристора внутри кармана окруженного кольцевой областью *p*-типа становится возможным перенос площадки катодной области тиристора на обратную сторону пластины,

при сохранении доступа к управляющим выводам катодного и анодного электрода на верхней поверхности кристалла, таким образом открывается доступ к управлению всеми составными элементами конструкции тиристора (или семестра). Такой подход позволит интегрировать схему выборочного управления составными транзисторами тиристора.

Сквозные каналы p -типа, благодаря большой поверхности образуемого p - n -перехода перспективны для снижения плотности тока в состоянии лавинного пробоя, что потенциально востребовано в полупроводниковых ограничителях напряжения, работающих на участке лавинного пробоя. Благодаря вертикальному размещению поверхности защитного p - n -перехода становится возможным достигнуть увеличение площади лавинного пробоя, таким образом может быть достигнуто снижение плотности лавинного тока без увеличения площади прибора.

Благодаря возможности изготовления вертикальных точечных контактных каналов открывается возможность изготовления тиристорной структуры с возможностью обрыва тока путем статической индукции, такой же механизм позволяет модулировать проводимость тиристора во включенном состоянии, что открывает путь к активному управлению характеристиками сверхмощных силовых приборов.

На предприятии ведется разработка новых силовых приборов на основе освоенного типа КССК пластин, а также ведется изучение путей расширения применения структур, содержащих сквозные каналы p -типа, для новых сфер электроники.

Проработка конструкции приборов ведется на АО «ВЗПП-Микрон» совместно с ЮРГПУ имени М. И. Платова.

УДК 544.6

Методика подбора системы добавок к электролиту для электрохимического осаждения меди методом двойного дамасцена

Кирюшина И. В., к. т. н.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

ikiryushina@niime.ru

В данной работе предложена методика подбора и исследования влияния органических добавок на качество электроосажденных слоев меди методом двойного дамасцена. Было показано, что корректное заполнение структур первого уровня металлизации является основным критерием правильного подбора соотношения добавок к электролиту при производстве изделий с проектными нормами 90 нм.

Ключевые слова: медный электролит; двойной дамасцен; медная металлизация; межсоединения; добавки к электролиту.

Введение

При формировании внутрикристалльной многоуровневой разводки для изделий с проектными нормами 130–90 нм и ниже используется медная металлизация [1]. Одной из наиболее критичных проблем является заполнение контактных окон без пустот и формирование горизонтального проводника без обрывов, которые происходят в одном процессе электрохимического осаждения меди и носит название метода двойного дамасцена. Целью настоящей работы было разработка методики подбора добавок (катализатора, ингибитора и выравнивателя) к медному электролиту и организации мониторинга состава электролита в массовом производстве изделий с проектными нормами 90 нм.

Эксперименты и методы

Эксперименты проводились на пластинах диаметром 200 мм со сформированной топологией под электрохимическое осаждение меди для горизонтальных проводников первого уровня. Заполнение структур медью контролировалось методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с большой объективной диафрагмой и предварительной подготовкой образца с использованием фокусирующего ионного пучка (ФИП) и методом извлечения ламели (тонкой пластинки их образца) in-situ lift-out. Для контроля качества формирования первого уровня металлизации на исследуемых пластинах использовались результаты проведения параметрических тестов. В качестве добавок к электролиту (катализатора, ингибитора и выравнивателя) исследовались Cubath Via-form Accelerator: Cubath Viaform Suppressor: Cubath Viaform Leveler = 6:2:3 (об. ч), производитель АТМІ и добавки другого производителя.

Результаты

Основным критерием правильности выбранного соотношения катализатора/ингибитора/выравнивателя в медном электролите — качественное заполнение вытравленных структур медью [2]. На рис. 1 показано электронно-микроскопическое изображение сформированного медного проводника первого горизонтального уровня.

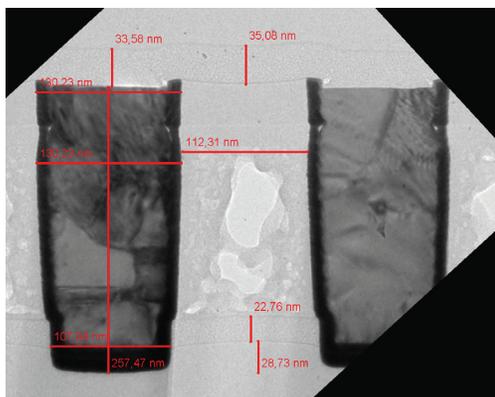


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение сформированного медного проводника первого горизонтального уровня

Эксперименты показали, что предложенная методика подбора добавок к электролиту для электрохимического осаждения меди позволяет получать все слои медной металлизации, соответствующие требованиям спецификации на изделие. В табл. 1 приведены результаты контроля вольт-амперных характеристик (ВАХ) на 4 пластинах после приведения химико-механической планаризации третьего слоя медной металлизации (Me3) с замерами 100% кадров на каждой из пластин.

Таблица 1. Результаты контроля основных критических параметров с помощью ВАХ после формирования Me3

Параметр	Что проверяет	Границы спецификации	Типовые значения (АТМ1)	Полученные средние значения по 4 пластинам (новый производитель)	Выходы за границы спецификации
RV2HD8K	Сопротивление переходного окна (отсутствие обрыва)	0,7–2,5 Ом/via	1,93	1,723	Отсутствуют
RLM3SLD	Удельное сопротивление медной шины Me3	250–528 мОм·мкм	430	409,1	Отсутствует
RS31414D	Поверхностное сопротивление шины Me3	56–106 мОм/□	76	77,3	Отсутствует

Заключение

Показано, что при подборе добавок к медному электролиту для создания внутрикристалльной металлизации качество заполнения структур первого уровня металлизации является ключевым, что связано с наименьшими топологическими размерами и наибольшим аспектным соотношением структур по сравнению с другими уровнями металлизации.

Литература

1. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристалльных и межкристалльных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201. DOI: 10.7868/S0544126915030084. EDN TPYAZV.
2. Chiu S. Y., Chang S. C., Lin K. C. et al. Characterization of additive systems for damascene Cu electroplating by the superfilling profile monitor // Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2000. Vol. 18. № 6. P. 2835–2841. DOI: 10.1116/1.1322042. EDN RQZUID.

УДК 776.1

Высококонтрастный щелочной проявитель для процессов фотолитографии

Кулинич И. В.¹, к. т. н., Кисилев С. А.², к. т. н., Непомнящих Д. В.¹,
Куценко М. А.¹, Меньшова А. В.¹

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
anp3leo@gmail.com

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

Проведены исследования состава и обогащающих добавок для щелочного высококонтрастного проявителя. Установлено оптимальное процентное соотношение веществ и оптимальная доля добавок. На основе разработанного щелочного проявителя проведены процессы фотолитографии по формированию двухслойной фоторезистивной маске для lift-off процесса и формированию топологического рисунка на хромовых фотошаблонах. Анализ результатов показал, что проявление фоторезиста осуществляется с аспектным соотношением проявления проэкспонированной области к не экспонированной 30:1, что позволяет реализовывать топологические элементы с технологическим допуском 25 нм

Ключевые слова: щелочной проявитель; топологический допуск; фотошаблон.

Разрешающая способность литографских процессов определяется оборудованием для операции экспонирования, а повторяемость процесса по большей части определяется качеством процесса проявления. Зарубежное производство материалов для микроэлектронных технологий пришло к концепции изготовления серии резистивных масок и специально подобранных к этим резистам проявителей. Немецкая фирма MicroChemicals GmbH, производит фоторезисты серии AZ и специальный проявитель AZ351B для этих резистов. Применение специализированного проявителя позволяет достичь высокой контрастности между проэкспонированными участками и не проэкспонированными участками фоторезиста, что позволяет формировать топологический размер с допуском в несколько сотне нанометров и реализовывать воспроизводимость этапа проявления. Традиционно в России проявления фоторезистов осуществлялось проявителями на основе КОН и NaOH. На сегодняшний день разработаны отечественные буферные проявители, но без добавления специализированных добавок. Такие проявители имеют место быть при технологическом допуске на топологический размер порядка 0,5 мкм. На производствах изделий микроэлектроники, где требуется технологический допуск 0,2 мкм и менее, применяются импортные фоторезисты и проявители.

Целью представленной работы являлось проведение исследований для подбора состава щелочного буферного проявителя со специализированными добавками, с аспектным соотношением проявления проэкспонированной области к не экспонированной 30:1.

Проведен анализ состава отечественного проявителя УПФ и зарубежного AZ351B с помощью ядерно-магнитного анализа. На основании полученных результатов анализа установлен состав проявителя AZ351B и процентное соотношение

веществ. Проведение технологических процессов экспонирования и проявления фоторезиста позволило определить оптимальный состав основных действующих веществ и подобрать оптимальный состав композиций для высокой контрастности.

В результате проведенных исследований была разработана методика приготовления высококонтрастного щелочного проявителей для проявления двуслойной фоторезистивной маски (lift-off процесс), для проявления фотошаблонов с топологической нормой до 0,5 мкм. Полученный проявитель позволил проводить процесс проявления фоторезистов с технологическим допуском 25 нм для литографии прямой прорисовки при изготовлении фотошаблонов с хромовым покрытием.

Литература

1. Тэм Дж., Палумбо Г., Эрб У. Последние достижения в области супергидрофобных электроосаждений // Материалы (Базель), 2016. — №9. — С. 1–27.
2. Мансураева Л. М., Юсупова И. И., Булаев С. А. Поверхностно-активные вещества: свойства и применение // Вестн. магистратуры, 2022. — № 2. — 1 (125).
3. Ware A. M., Waghmare J. T., Momin S. A. Alkylpolyglycoside: carbohydrate based surfactant // J. of Dispersion Science and Technology, 2007. Vol. 28. № 2. P. 437–444.

УДК 66.095.26-922.2

Создание технологии производства ПАВ для безметалльного проявителя**Тарасов А. Е.¹, к. х. н., Курбатов В. Г.¹, к. х. н., Пугачева Т. А.¹, Варламов Д. А.², Сенченко Н. С.², Малков Г. В.¹, к. х. н., Бадамшина Э. Р.¹, д. х. н.**¹ *Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН**142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1
atarasov@icp.ac.ru*² *АО «НИИМЭ»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

Разработана технология получения ПАВ для безметалльного проявителя, являющегося сополимером окиси этилена с окисью пропилена. Оптимизировано количество реагентов для получения ПАВ с необходимыми свойствами (структура, молекулярно-массовые параметры; поверхностное натяжение).

Процесс фотолитографии для производства интегральных схем является достаточно сложным и материалоемким. При этом индустрия микроэлектроники постоянно сокращает размер элементов интегральных схем, которые состоят из ряда функциональных слоев с рисунком (изоляторы, металлические провода). Структура каждого слоя переносится с маски с помощью фотолитографического процесса с последующим травлением и ионной имплантацией с получением элементов требуемых размеров.

В процессе фотолитографии функциональный слой подложки покрывается фоторезистивной пленкой из химически усиленного фоторезиста, состоящего из полимера с кислотно-лабильной подвешенной защитной группой, молекула — фотогенераторов кислот (ФГК) и дополнительных добавок. При воздействии ультрафиолетового излучения через маску с рисунком ФГК разлагается, делая нерастворимый полимер растворимым в щелочном проявителе (позитивные фоторезисты).

При мокром проявлении с использованием, например, раствора гидроксида тетраметиламмония экспонированные участки резиста удаляются, и остается рисунок из неэкспонированных линий/дорожек фоторезиста. Чтобы выполнить требования по минимизации размера элемента, ширина фоторезистивных структур должна, соответственно, уменьшаться. При этом их высоту уменьшать нельзя, поскольку необходимо сохранить стойкость к плазмохимическому травлению. Это приводит к резкому увеличению отношения высоты линии к ее ширине (аспектного отношения), с ростом которого механическая прочность линий фоторезиста снижается, что приводит к «схлопыванию» (коллапсу) структур. Было показано, что этот, так называемый, коллапс рисунка вызван несбалансированными капиллярными силами, действующими между линиями во время стадии сушки после проявления. Среди различных подходов, позволяющих предотвратить коллапс линий фоторезиста, наиболее простым представляется уменьшение капиллярных сил добавкой в проявитель поверхностно-активных веществ (ПАВ). Небольшие добавки ПАВ в безметалльный проявитель (водный раствор

тетраметиламмоний гидроксида) улучшают смачиваемость гидрофобной поверхности фоторезиста, увеличивают скорость проявления, способствуют получению дорожек с лучшими показателями по стабильности размеров, воспроизводимости, что, в итоге, приводит к уменьшению брака на производстве, т. е. улучшается технологичность процесса.

Известно, что в качестве такого рода ПАВ могут быть эффективно использованы катионные, однако возникают сложности с их очисткой от микропримесей ионов металлов, поскольку к материалам для микроэлектроники предъявляются особые требования по чистоте. Так например, для изготовления микросхем с топологией менее 300 нм требуется использование реагентов со степенью чистоты до 50 ppb ($5 \cdot 10^{-6}$ масс.%) по содержанию каждой из более десяти контролируемых примесей катионов, и с регламентированным содержанием частиц размером >50 нм. В этом плане целесообразным представляется использование особо чистых неионогенных ПАВ, например, блоксополимеров окиси этилена и окиси пропилена. Несмотря на то, что неионогенные ПАВ широко известны и их производство налажено, в том числе в нашей стране, они непригодны для использования в области микроэлектроники, так как не отвечают требованию низкого содержания примесей в своем составе, очистка от которых до требуемого уровня на существующих технологических линиях невозможна.

Разработана технология получения неионогенного поверхностно-активного вещества для безметалльного проявителя, представляющего собой сополимер окиси этилена с окисью пропилена. Проведены исследования по подбора оптимального количества катализатора, сокатализатора и соотношения компонентов для получения олигомерного ПАВ с необходимыми свойствами (структура, молекулярно-массовые параметры; поверхностное натяжение).

УДК 538.91

Исследование эволюции массивов плазмонных наночастиц на поверхности SiO₂ в процессе отжига

Гришин Т. С.^{1,2}, Волкова Л. С.^{1,2}, Громов Д. Г.²¹ ИИМЭ РАН

119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В докладе приводится метод формирования массивов Au и Ag наночастиц на поверхности твердого тела, которые могут быть использованы в качестве чувствительных слоев электронных устройств. Формирование массива наночастиц происходит в результате отжига исходной тонкой пленки, при этом выбор толщины исходного слоя и температуры отжига позволяет управлять геометрическими параметрами массива.

Ключевые слова: металлические наночастицы; плазмонный резонанс; чувствительные слои; эволюция слоев; магнетронное напыление.

Массивы металлических наночастиц на твердотельной подложке находят множество применений благодаря своим плазмонным свойствам. В частности, массивы Au и Ag наночастиц могут использоваться в устройствах сенсорики, солнечных элементах, оптических фильтрах и в качестве подложек для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния [1]. Оптические свойства таких массивов в значительной степени определяются средним размером наночастиц и степенью заполнения подложки. Актуальной задачей является разработка технологии формирования на подложке массива металлических наночастиц с наперед заданными геометрическими параметрами совместимой с кремниевой технологией.

Формирование массивов происходит в результате низкотемпературного (до 400 °С) отжига в инертной атмосфере исходных тонких пленок Au и Ag, сформированных методом магнетронного напыления. Было исследовано формирование массивов из исходных пленок различной толщины (от 2 до 10 нм) при различных температурах (от 80 до 400 °С). Исходные слои представляли собой островковые пленки с различной степенью заполнения подложки.

Разрыв исходного слоя происходит в диапазоне температур от 80 до 120 °С, укрупнения частиц начинается при 100 °С и выходит в насыщение к примерно 300 °С. С помощью просвечивающей электронной микроскопии определено что для Au и Ag характерны различные механизмы объединения и укрупнения наночастиц, две Au наночастицы объединяются скачком друг к другу, а Ag наночастицы укрупняются за счет массопереноса от одной наночастицы к другой, более крупной.

На основании данных сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии были получены зависимости среднего размера наночастиц в массиве и степени заполнения подложки от температуры отжига для различных толщин исходных слоев Au и Ag. Таким образом, было показано, что путем изменения тощины исходного слоя и температуры отжига можно в широких пределах управлять геометрическими параметрами массива наночастиц.

Литература

1. Gromov D. G., Dubkov S. V., Savitskiy A. I. et al. Optimization of nanostructures based on Au, Ag, Au–Ag nanoparticles formed by thermal evaporation in vacuum for SERS applications // Applied Surface Science, 2019. 489. P. 701–707.

УДК 531.717

Исследование поверхности пластин поликристаллического алмаза после термохимической обработки

Дерябкин А. В., Куликов Е. Н.¹, Федоров Ю. Ю.¹

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

Istok220@mail.ru

Образцы подложек из поликристаллического CVD алмаза подвергались термохимической обработке. Полученные данные позволили уточнить сведения о характере обработки и оценить ее качество.

Ключевые слова: алмаз; профилометрия; оптический профилометр; обработка поверхности; шероховатость.

Поликристаллический алмаз является перспективным материалом для изделий микроэлектронной техники. Поликристаллический алмаз после процесса CVD роста требует последующей обработки, шлифования. Это особенно важно при использовании алмаза в качестве высокоэффективного теплоотвода, т. к. дефекты поверхности мешают передаче тепла от полупроводникового кристалла к теплоотводящей подложке. Шероховатость теплоотвода Ra не должна превышать 1 мкм.

Для получения требуемых значений шероховатости был применен процесс термохимической обработки [1]. Метод основан на взаимодействии и интенсивном растворении углерода из алмаза в местах соприкосновения с металлом при температурах 900–1180 °С. При применении метода на железе, не удается получить шероховатость поверхности алмаза менее 2 мкм. Это связано со свойством железа при нагреве изменять свою кристаллическую решетку, шероховатость полированной пластины ухудшается при температуре выше 917 °С. Для решения этой задачи необходимо использовать никель, так как он не обладает подобным свойством, шероховатость поверхности полированной пластины не меняется во всем диапазоне температур процесса термошлифовки, что дает возможным получить шероховатость алмаза менее 1 мкм.

Оценку шероховатости поверхности проводили с помощью атомно-силового микроскопа SolverP47 Pro, профилометра Zygo ZeGage Pro HR и профилометра АБРИС-ПМ7. В работе показана перспективность использования профилометрии для контроля качества поверхности подложек на основе алмаза после термохимической обработки поверхности [2].

Литература

1. Духновский М. П., Ратникова А. К., Федоров Ю. Ю., Кудряшов О. Ю., Леонтьев И. А. Термическая обработка поликристаллического CVD — алмаза с целью формирования гладкой поверхности // Электронная техника. Серия 1: СВЧ электроника, 2008. — Вып. 2 (495). — С. 41–46.
2. Дерябкин А. В., Куликов Е. Н., Фёдоров Ю. Ю., Шепелев В. А., Фещенко В. С. // Применение оптической профилометрии для контроля качества термохимической обработки подложек на основе алмаза для микроэлектроники // Сборник докладов XIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2024. — С. 378–482.

УДК 538.91

Особенности пробоподготовки современных СБИС для исследований с помощью ПЭМ

Волкова Л. С.^{1,2}, Гришин Т. С.^{1,2}

¹ ИИМЭ РАН

119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В докладе рассматриваются особенности подготовки тонких поперечных срезов транзисторных слоев современных СБИС с помощью фокусированного ионного пучка для их дальнейших исследований с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

Ключевые слова: пробоподготовка; просвечивающая электронная микроскопия; сканирующая электронная микроскопия; фокусированный ионный пучок; FinFET.

Характерными особенностями современных СБИС, построенных на базе технологии FinFET, являются: сложная трехмерная структура, наличие слоев high-k-диэлектриков толщиной в единицы нанометров, наличие GeSi-областей и топологическая норма в 7 нм и менее. В силу увеличивающейся миниатюризации, измерение критических размеров, элементный анализ и исследование структуры затруднены и требуют новых подходов. Разработка подходов к проведению таких исследований, как на этапах производства в качестве межоперационного контроля, при анализе отказов, так и при обратном проектировании и поиске незадокументированных включений в СБИС, является актуальной и важной задачей.

Измерение критических размеров, а также структурные исследования кросс-секций элементов современных СБИС возможно проводить с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), однако, толщина образца для обеспечения высокого разрешения не должна превышать 20 нм. Тонкие срезы образца (ламели) изготавливаются с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) с фокусированным ионным пучком (ФИП). Однако, воздействие высокоэнергичных ионов может привести к аморфизации образца, что ведет к невозможности правильной оценки структуры образца [1]. Другой серьезной трудностью является различие в скоростях ионного травления разных материалов [2].

В докладе обсуждается подход к преодолению вышеописанных трудностей при подготовке ламелей для исследований СБИС и их дальнейшее исследование с помощью ПЭМ. В качестве объекта использовалась современная коммерчески доступная СБИС с топологической нормой 7 нм, предварительно извлеченная из корпуса. С помощью ФИП при ускоряющем напряжении 30 кВ создавалось поперечное сечение слоя транзисторов, затем ламель извлекалась с помощью наноманипулятора и утонялась и полировалась пучком ионов при ускоряющем напряжении 2 кВ. Вдоль ламели был выполнен градиент толщины от 100 до 20 нм, так как для обеспечения высокого разрешения и исследований структуры необходима минимально возможная толщина образца, тогда как элементный анализ с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии лучше проводить на несколько более толстых образцах.

Литература

1. Bonifacio C. S. et al. Post-FIB cleaning of TEM specimens from 14 nm and other Fin-FETs by concentrated argon ion milling // *Electronic devise failure analysis*, 2019. 21 (4). P. 4–12.
2. Denisyuk A. et al. Mitigating Curtaining Artifacts during Ga FIB TEM Lamella Preparation of a 14 nm FinFET Device // *Microscopy and Microanalysis*, 2017. 23 (3). P. 1–7.



УДК 621.384.6 + 681.6-32

Перспективы высокопроизводительной печатной электроники на основе неорганических полупроводников

Иванов В. В.

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
ivanov.vv@mipt.ru*

Обсуждается развитие нового поколения печатной электроники на основе неорганических полупроводников с высокой подвижностью носителей заряда ($10\text{--}1000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), включая использование нанокристаллов на основе Si, GaAs, GaN, InAs, MoS₂, MoSe₂, оксидных полупроводников IGZO и углеродных нанотрубок.

Ключевые слова: печатная электроника; неорганические полупроводники; подвижность носителей заряда; нанокристаллы; оксиды; УНТ.

Печатная электроника (ПЭ), определяемая как печать электронных схем на различных плоских и неплоских подложках, таких как бумага, полимеры и текстиль, характеризуется быстрым развитием, перспективой низкой стоимости, крупносерийного и высокопроизводительного производства электронных устройств. В настоящее время происходит переход от применения ПЭ в интеграции готовых электронных устройств на гибкой печатной плате к печати функциональными чернилами активных элементов микроэлектроники и схем электронных устройств с достаточно высоким быстродействием. Для развития нового поколения печатной электроники разрабатываются неорганические полупроводниковые материалы с достаточно высокой подвижностью носителей заряда ($10\text{--}1000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) и активные элементы на их основе [1]. В качестве перспективных неорганических полупроводников активно исследуются металлооксидные полупроводники InGaZnO с подвижностью зарядов в транзисторе до $350\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и отношением токов включенного и выключенного состояний $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ более 10^4 . В последние годы значительное количество исследований выполняется по печати транзисторов полупроводниковыми нанокристаллами в форме нанопроволок, нанолент и наномембран на основе Si, GaAs, GaN, InAs, MoS₂, MoSe₂ и др. с подвижностью зарядов от 100 до $1600\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. При нанесении на подложку таких анизотропных и длинномерных нанокристаллов ключевую роль играет обеспечение их ориентированной укладки.

Особый интерес проявляется к работам по созданию элементов микроэлектроники на основе полупроводниковых углеродных нанотрубок [2], характеризующихся подвижностью зарядов порядка $10^5\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, в 10 раз превышающей монокристалльный Si. Для эффективного развития неорганической печатной электроники необходимо исследование фундаментальной физики устройств, эффектов изгибающих воздействий на гибких подложках, инновационных подходов изготовления и новых форм-факторов, необходимых для удовлетворения потребности этого нового поколения высокопроизводительной электроники.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560.

Литература

1. Abhishek Singh Dahiya, Dhayalan Shakthivel, Yogeenth Kumaresan, Ayoub Zumeit, Adamos Christou and Ravinder Dahiya. High-performance printed electronics based on inorganic semiconducting nano to chip scale structures // Nano Convergence, 2020.
2. Franklin A. D., Hersam M. C., Wong H.-S. P. Carbon nanotube transistors: Making electronics from molecules // Science, 2022. Vol. 378. P. 726–732.



УДК 621.373.8

Квантовые точки и лазеры на их основе для интегральной оптоэлектроники

Жуков А. Е., д. ф.-м. н., Иванов К. А., к. ф.-м. н., Комаров С. Д.,
Махов И. С., к. ф.-м. н., Мельниченко И. А., Моисеев Э. И.,
Надточий А. М., к. ф.-м. н., Крыжановская Н. В., д. ф.-м. н.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
194100, г. Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, 16
zhuckale@yandex.ru; aezhukov@hse.ru*

Представлены результаты исследований лазеров на основе самоорганизующихся квантовых точек, демонстрирующие их достоинства в качестве источника излучения для интегральной оптоэлектроники. Приведены примеры микролазеров, в том числе гибридно или монолитно интегрированных с кремнием, а также примеры интеграции с другими элементами.

Ключевые слова: квантовые точки; лазеры; микролазеры; интегральная оптоэлектроника.

В 2023 году глобальный потребительский интернет-трафик превысил 4 зеттабайта. При этом на долю объема обрабатываемых данных, остающегося внутри дата-центра, приходится более 70% его общего трафика (если при этом не учитывать данные, которые не выходят за пределы каждой конкретной серверной стойки, а если учитывать этот локальный трафик, то более 90%). Таким образом, имеется потребность в обработке больших объемов данных, при которой передача осуществляется на малые и сверхмалые расстояния. Актуальным является внедрение принципов оптической связи для реализации сетей внутри центров обработки данных или даже между процессором и памятью [1]. В предельном случае оптические сигналы могут использоваться для соединения фотонных и микроэлектронных элементов внутри одной оптоэлектронной интегральной схемы. Кремний остается основным материалом микроэлектроники, и, кроме того, продемонстрирован значительный прогресс в реализации пассивных фотонных компонентов и интегральных схем на основе кремния. К сожалению, эффективные источники света на основе кремния до сих пор не реализованы вследствие не прямой структуры электронных зон.

Преодолеть эту трудность может формирование лазеров на основе материалов A^3B^5 , синтезированных на кремнии либо перенесенных на кремниевую подложку [2]. Самоорганизующиеся квантовые точки являются перспективным материалом для использования в качестве активной области таких лазеров благодаря следующим свойствам:

- низкая чувствительность к эпитаксиальным дефектам, возникающим при росте A^3B^5 на кремнии;
- низкая чувствительность к поверхностной безызлучательной рекомбинации, что позволяет формировать лазерные резонаторы малого размера (микролазеры);
- возможность достижения длины волны 1.1 μm –1.3 μm , соответствующей низким потерям в кремнии, SiO_2 , Si_3N_4 ;
- низкие пороговые плотности тока и высокая температурная стабильность.

Для использования в оптоэлектронной интегральной схеме лазер должен обладать малыми размерами. При этом типичные размеры традиционных лазерных диодов (около 1 мм) весьма велики. Перспективным является использование лазерных микрорезонаторов, поддерживающих моды шепчущей галереи — микродиски, микрокольца и их модификации. Благодаря высокому коэффициенту отражения от вертикальных боковых стенок низкие оптические потери достигаются даже в случае, когда размеры лазера составляют десятки, а иногда и единицы микрометров. Были продемонстрированы микродисковые лазеры с квантовыми точками, изготовленные из эпитаксиальных структур, синтезированных на кремнии или перенесенных на поверхность кремния [3]. Альтернативным подходом является использование лазеров полосковой конструкции с малой длиной резонатора, что оказывается возможным в случае использования квантовых точек высокой поверхностной плотности. Формированию интегральных схем способствует то обстоятельство, что лазеры на квантовых точках допускают использование зеркал, изготовленных с помощью травления ионным пучком. Низкая плотность тока прозрачности и неоднородно уширенный спектр усиления делают квантовые точки перспективными для использования в качестве активной области полупроводниковых оптических усилителей и фотодетекторов. Возможно формирование как лазера, так и фотоприемника из одной и той же эпитаксиальной структуры.

Литература

1. Sun C., Wade M. T., Lee Y. et al. Single-chip microprocessor that communicates directly using light // *Nature*, 2015. Vol. 528. P. 534–538.
2. Norman J. C., Jung D., Wan Y., Bowers E. Perspective: The future of quantum dot photonic integrated circuits // *APL Photonics*, 2018. Vol. 3. P. 030901.
3. Zhukov A. E., Kryzhanovskaya N. V., Moiseev E. I., Maximov M. V. Quantum-dot microlasers based on whispering gallery mode resonators // *Light: Science & Applications.*, 2021. Vol. 10. P. 80.



УДК 538.958

SiGe-гетероструктуры в микрорезонаторах для создания Si-совместимых излучателей ближнего ИК-диапазона

Юрасов Д. В.¹, Степихова М. В.¹, Яблонский А. Н.¹, Перетокин А. В.¹, Шалеев М. В.¹, Дьяков С. А.², Гиппиус Н. А.², Тиходеев С. Г.³, Родякина Е. Е.⁴, Смагина Ж. В.⁴, Новиков А. В.¹

¹ Институт физики микроструктур РАН
603087, г. Нижегородская обл., д. Афонино, ул. Академическая, 7
Inquisitor@ipmras.ru

² Сколковский институт науки и технологий
143025, г. Москва, Большой бульв., 30, стр. 1

³ МГУ им. М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

⁴ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

Исследовано формирование источников излучения ближнего ИК-диапазона на основе SiGe-гетероструктур. Рассмотрен подход по встраиванию таких излучателей в микрорезонаторы различного дизайна в целях как повышения их эффективности, так и получения дополнительных возможностей по управлению излучением.

Ключевые слова: SiGe-гетероструктуры; Si-фотоника; ближний ИК; микрорезонаторы; фотонные кристаллы; люминесценция.

К настоящему времени традиционный подход по увеличению быстродействия вычислительных устройств за счет масштабирования, т.е. за счет уменьшения размеров транзисторов, практически исчерпал свой потенциал. Элементы транзисторов достигли размеров в единицы нанометров, и дальнейшее продвижение крайне затруднительно. В связи с этим активно исследуется идея перехода к оптоэлектронике, где передача информации будет осуществляться за счет фотонов, а не электронов, что поможет радикально снизить энергопотребление и увеличить быстродействие. Многие Si-совместимые оптоэлектронные и фотонные элементы (модуляторы, волноводы, мультиплексоры, детекторы) уже созданы, но до сих пор отсутствует решение по созданию коммерчески эффективного светоизлучающего устройства на основе Si в ближнем ИК-диапазоне. Это связано с тем, что Si является непрямозонным полупроводником и его эффективность как излучателя крайне низка. В настоящее время в основном используется гибридный подход — светоизлучающие элементы (LED, лазеры) создаются на основе прямозонных полупроводников семейства A^3B^5 , которые тем или иным способом интегрируются с Si КМОП-технологией [1]. Однако в силу различных типов и параметров кристаллической решетки, различных коэффициентов температурного расширения и др. интеграция полупроводников A^3B^5 с Si является достаточно сложной задачей. Кроме того, использование гибридных структур A^3B^5/Si значительно повышает итоговую стоимость чипов.

Потенциально перспективным видится создание источников излучения ближнего ИК-диапазона на основе гетероструктур на основе материалов IV группы (SiGe, SiGeSn) ввиду их полной совместимости с Si КМОП-технологией [2]. Однако

их эффективность как излучателей также низка по сравнению с материалами A^3B^5 . Одним из способов повышения эффективности светоизлучающих структур является их зонная инженерия для роста внутренней квантовой эффективности, а также встраивание их в микрорезонаторы. Особо перспективными являются диэлектрические микрорезонаторы, т.к. омические потери в них крайне малы. В настоящей работе приведен обзор достижений по созданию источников излучения ближнего и среднего ИК-диапазона на основе нескольких видов гетероструктур на основе материалов IV группы, встроенных в различные микрорезонаторы. В частности, в качестве активной среды рассмотрены Ge квантовые точки, структуры на основе локально растянутых слоев Ge и структуры на основе слоев SiGeSn. Описаны некоторые способы их зонной инженерии для модификации оптических свойств. Приведены результаты по их встраиванию в диэлектрические микрорезонаторы на основе фотонных кристаллов, а также в Ми-резонаторы.

*Работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники»
(соглашение № 075-15-2022-316).*

Литература

1. Kunert B., Mols Y., Baryshnikova M., Waldron N., Schulze A. and Langer R. How to control defect formation in monolithic III/V hetero-epitaxy on (100) Si? A critical review on current approaches // *Semicond. Sci. Technol.*, 2018. Vol. 633. P. 093002.
2. *Silicon Photonics IV. Innovative Frontiers* / Ed. by D.J. Lockwood and L. Pavesi // *Topics in Applied Physics*, 2021. Vol. 139. Springer publishing.



УДК 621.382

Квантовая наноэлектроника: фундаментальные ограничения и перспективы развития

Арутюнов К. Ю.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34*

² *ИФП им. П. Л. Капицы РАН
119334, г. Москва, ул. Косыгина, 2*

Представлен обзор основных причин, ограничивающих миниатюризацию наноэлектронных устройств: увеличение тепловыделения на единицу объема и различных квантовых размерных эффектов. Очевидно, что эти ограничения не должны игнорироваться при проектировании сверхминиатюрных наноэлектронных цепей нового поколения. Однако наряду с негативным влиянием квантовых эффектов на работу «стандартных» устройств эти явления могут быть использованы для построения качественно новых элементов, основанных на отличных от классических принципах передачи, обработки и хранения информации.

Ключевые слова: нанотехнология; сверхпроводимость; криоэлектроника; квантовая наноэлектроника.

В последние годы наблюдаются отклонения от хорошо известного правила Мура [1], описывавшего рост степени интеграции элементной базы микроэлектроники на протяжении нескольких десятилетий ее развития и построенной с применением стандартной КМОП-технологии. Обычно выделяют две основные причины: увеличение тепловыделения на единицу объема и различные квантовые размерные эффекты [2].

Представляется крайне заманчивым использовать сверхпроводящие материалы, в которых протекание электрического тока происходит бездиссипативно. Однако и в сверхпроводниках присутствуют различные размерные ограничения, приводящие к отклонению поведения таких сверхминиатюрных систем от стандартных объектов макроскопических размеров, например наличие конечного электрического сопротивления. В докладе обсуждаются различные нетривиальные эффекты в низкоразмерных сверхпроводниках [3] и приводятся примеры сверхпроводящих устройств нанометровых размеров: элементов квантовой логики (кубитов) [4], не содержащего диэлектрических слоев «одноэлектронного» сверхпроводящего транзистора [5] и квантового эталона силы электрического тока [6].

*Работа поддержана Российским научным фондом,
проект 23-72-00018 «Исследование неравновесных
и граничных явлений в сверхпроводящих гибридных наноструктурах».*

Литература

1. Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits // Electronics, 1965. № 8. P. 114.
2. Sedov E. A., Riikonen Kari-Pekka and Konstantin Yu. A. Quantum size phenomena in single-crystalline bismuth nanostructures // Nature: Quantum Materials 2, 2017. № 18.

3. Arutyunov K. Yu., Golubev D. S. and Zaikin A. D. Superconductivity in one dimension // *Physics Reports*, 2008. 464, 1–70.
4. Astafiev O. V., Ioffe L. B., Kafanov S., Pashkin Yu. A., Arutyunov K. Yu., Shahar D., Cohen O., Tsai J. S. Coherent quantum phase slip // *Nature*, 2012. 484 (7394), 355.
5. Arutyunov K. Yu., Lehtinen J. S. Junctionless Cooper pair transistor // *Physica C: Superconductivity and its applications*, 2017. 533, 158.
6. Wang Z., Lehtinen J. S. and Arutyunov K. Yu. Towards quantum phase slip based standard of electric current // *Appl. Phys. Lett.*, 2019. 114, 242601.



УДК 621.382.32

SPICE-моделирование ВАХ КНС КМОП-транзисторов с учетом технологического разброса параметров и воздействия температуры

Старилова Е. В., Хобов А. П., Исмаил-Заде М. Р.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

(Московский институт электроники и математики)

123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34

mismailzade@hse.ru

В работе отлажены на основе результатов измерений SPICE-модели для схемотехнического моделирования характеристик субмикронных КНС КМОП-транзисторов для проектирования КНС КМОП БИС с учетом технологического разброса параметров и воздействия температуры.

Ключевые слова: температура; кремний на сапфире; МОП-транзистор; SPICE-модели; схемотехническое моделирование; определение параметров модели; технологический разброс.

Введение

Одной из важнейших тенденций развития современной КМОП-технологии является уменьшение размеров транзисторов и других элементов интегральных схем (масштабирование). Более того, даже для хорошо отлаженных, управляемых и устойчивых процессов статистический разброс параметров этих элементов неизбежно увеличивается [1–3]. Разброс параметров транзисторов в интегральных схемах является результатом пространственных и временных флуктуаций технологического процесса, таких как колебания легирующих примесей, шероховатость кромок затвора и др.

Разброс технологических параметров приводит к разбросу параметров электронных компонентов, что приводит к разбросу параметров ИС в целом [4, 5] и, как следствие, ухудшению соотношения точности, быстродействия и энергопотребления [6].

Компьютерное моделирование электронных компонентов с учетом статистического разброса параметров элементов дает следующие возможности [7]:

- 1) снижение чувствительности схемы к разбросу параметров физической структуры за счет оптимального подбора размеров транзисторов и их взаимного расположения;
- 2) повышение параметрической надежности разрабатываемых электронных устройств;
- 3) повышение достоверности схемотехнического проектирования.

В данной работе предпринята попытка оценить технологический разброс параметров отечественной КНС КМОП-технологии с проектными нормами $L_{min} = 1,7$ мкм.

Экспериментальное исследование ВАХ КНС МОПТ

Были исследованы результаты измерений электрических характеристик КНС МОП-транзисторов с минимальной длиной канала $L_{min} = 1,7$ мкм и напряжением питания 7 В. Тестовая структура включает в себя *n*- и *p*-канальные транзисторы с размерами: диапазон ширины каналов $W = 5,2$ –100 мкм; диапазон длин каналов $L = 1,7$ –40 мкм.

Каждая тестовая структура содержит 92 кадра. Использовались усредненные измеренные характеристики для тестовых транзисторов каждого размера.

Методика учета технологического разброса в SPICE-моделях

Основными параметрами модели МОП-транзистора являются удельная крутизна, пороговое напряжение, коэффициент модуляции длины канала и ток насыщения. Первоначально определяются средние значения данных параметров, а также рассчитываются средние отклонения σ . Из-за физических и химических процессов во время изготовления транзисторов возникает технологический разброс, и для того, чтобы учесть его в SPICE-схемах, строятся угловые модели для данных параметров. В этом методе используется статистический подход для определения крайних точек значений параметров транзисторов. Для аналоговых и цифровых применений создаются четыре угловых случая: SS (медленные nMOS и pMOS) и FF (быстрые nMOS и pMOS) для аналоговых, а также FS (быстрые nMOS и медленные

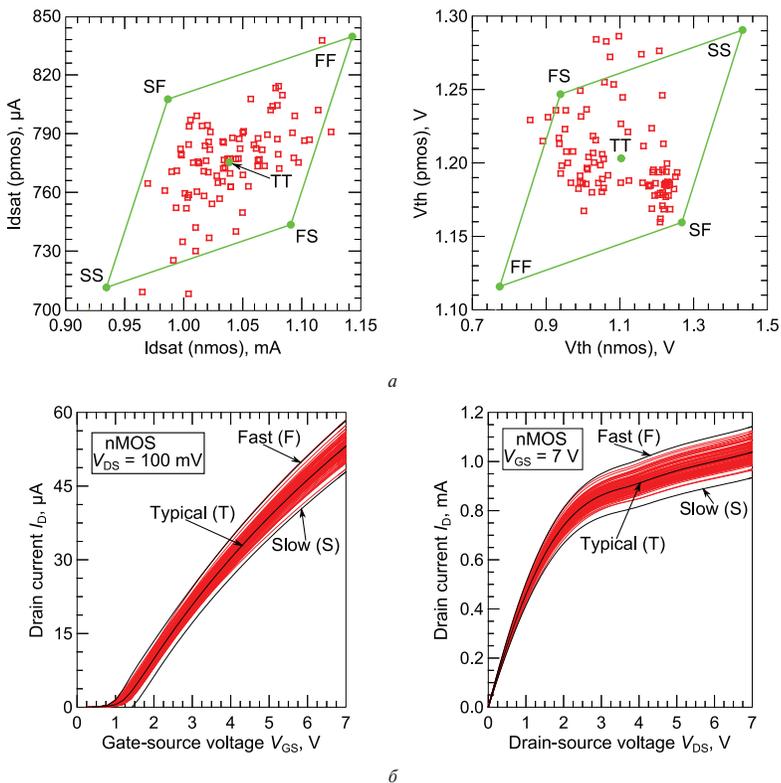


Рис. 1. Разброс параметров I_{dsat} и V_{th} для n - и p -МОПТ (а). Сравнение измеренных и смоделированных с помощью угловой модели сток-затворных и выходных ВАХ КНС n -МОПТ с $W/L = 5,2/1,7$ мкм (красные символы — эксперимент, линии — моделирование)



pMOS) и SF (медленные nMOS и быстрые pMOS) для цифровых [4]. Эти точки представляют собой экстремальные случаи, охватывая все возможные промежуточные значения. Для этого параметры смещаются относительно среднего значения (ТТ) на величину $\pm 3\sigma$, где σ — стандартное отклонение. Такой подход позволяет охватить как наилучший, так и наихудший случай технологического разброса.

В данной работе подбирались следующие параметры МОП-транзистора: пороговое напряжение, ток насыщения и подвижность. Графическое представление угловых точек, построенных на основе экспериментальных данных, приведено на рис. 1а.

Следующим этапом является определение полного набора параметров SPICE-моделей для *n*- и *p*-МОПТ для случая ТТ (типичный nMOS и pMOS).

Для учета точек (SS, FF, SF, FS) угловой модели необходимо в базовой SPICE-модели ТТ изменить параметры, которые наиболее чувствительны к технологическому разбросу. Для МОП-транзисторов это параметры, отвечающие за пороговое напряжение V_{th} , за подвижность носителей заряда μ_{eff} , за изменение длины L и ширины W канала, за сопротивление сток-исток R_{DS} .

Возможности представленной угловой модели на основе стандартной модели BSIMSOIv.4 проиллюстрированы на примере моделирования ВАХ *n*-канального КНС МОПТ с $W/L = 5,2/1,7$ мкм (см. рис. 1б).

Заключение

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

- 1) проведены обработка и анализ измеренных электрических характеристик большого набора тестовых КНС МОПТ по 92 кадрам;
- 2) на основе стандартной модели BSIMSOIv.4 разработаны SPICE-модели КНС МОПТ, учитывающие технологический разброс основных параметров;
- 3) определены параметры разработанных SPICE-моделей для *n*- и *p*-канальных КНС МОПТ.

Литературы

1. Pradeep K., Poiroux T., Scheer P., Juge A., Gouget G., Ghibaudo G. // IEDM, 2018. P. 17.1.1–17.1.4.
2. Asenov Ase. and Khairulmizam Samsudin. Variability in nanoscale UTB SOI devices and its impact on circuits and systems. *Nanoscaled SOI Structures and Devices*. Springer, Dordrecht, 2007. P. 259–302.
3. Mrosczyk P. and Dudek P. Tunable CMOS delay gate with improved matching properties // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 61 (9) (2014). P. 2586–2595.
4. Saha S. K. Compact MOSFET modeling for process variability-aware VLSI circuit design // *IEEE access*, 2014. 2, 104–115.
5. Pradeep K., Poiroux T., Scheer P., Juge A., Gouget G., Ghibaudo G. Analysis and modeling of wafer-level process variability in 28 nm FD-SOI using split C-V measurements // *Solid-State Electronics*, 2018. 145. P. 19–28.
6. Toro-Frias A., Martin-Lloret P. et al. Reliability simulation for analog ICs: Goals, solution and challenges // *Integration*, 2016. Vol. 55. P. 341–348.
7. Patil S. R. and Gautam D. K. Statistical modeling of logic gates and flip-flops for high speed CMOS circuits applications // *Silicon*, 2017. 9 (3). P. 371–378.

УДК 621.372.412

Кварцевые генераторы. Перспективы развития

Ложников А. О., к. т. н.

АО «ОНИИП»

644071, г. Омск, ул. Масленникова, 231

crystal@oniip.ru

Приводятся последние достижения в области разработок и производства кварцевых резонаторов. Приведены физические ограничения параметров, достижимых в кварцевых генераторах, и способы их улучшения.

Ключевые слова: кварцевый генератор; фазовые шумы; стабильность частоты; термокомпенсация; термостатирование.

Стабильность частоты в 40-е годы XX века составляла $2 \cdot 10^{-4}$, затем во всем мире начинается бурный рост и развитие данного направления, к 2000-му году стабильность достигает $1 \cdot 10^{-10}$ и при определенных условиях в наше время может достигать $1 \cdot 10^{-11}$ [1]. Имеется ввиду температурная стабильность, то есть относительное изменение частоты от изменения температуры среды. Различают также кратковременную стабильность, которая обычно измеряется за время от 0,1 до 10 секунд, и долговременную, которая измеряется за сутки, месяц, год и за весь срок работы генератора.

На текущее время стабильность кварцевых генераторов и их миниатюризация еще не достигли физических ограничений [2]. Но развитие данного направления идет неспешно, так как в большинстве случаев нецелесообразно с экономической точки зрения обеспечивать высокую стабильность в таких изделиях. Легче изготовить относительно простой кварцевый генератор и подстраивать его частоту, опираясь на сигналы глобальных навигационных спутниковых систем или атомных стандартов. Однако в плане достижения фазовых шумов и кратковременной нестабильности частоты лучше кварцевых генераторов в настоящее время ничего не существует. Поэтому кварцевые генераторы актуальны и выпускаются в больших объемах. Например, современные автомобили высокого класса имеют на борту до 100 кварцевых генераторов. Это касается термокомпенсированных и простых тактовых генераторов со стабильностью от $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $50 \cdot 10^{-6}$.

Потребность в более стабильных генераторах меньше. Они, как правило, реализованы термостатированием резонатора и используются в базовых станциях связи, высокоточных навигационных системах, радиолокационных станциях и измерительных приборах. Долговременная и температурная стабильность частоты таких генераторов варьируется от $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-7}$. Кратковременная стабильность таких генераторов за 1 секунду может быть лучше $1 \cdot 10^{-13}$, и она лучше всего описывается графиком фазовых шумов.

Единица измерения спектральной плотности мощности фазовых шумов — дБн/Гц, это мощность шума, сосредоточенного в полосе 1 Гц на заданной отстройке от несущей, отнесенная к полной мощности несущей. Фазовые шумы при близких отстройках 0,1–100 Гц, как правило, определяются добротностью и качеством резонансного колебательного контура генератора, в нашем случае — кварцевым резонатором. При отстройках 100 Гц и выше — схемой, ее тепловыми шумами. Лучшие образцы генераторов достигают уровня фазовых шумов до минус 150 дБн/Гц



при отстройке 10 Гц и до -190 дБн/Гц при отстройках 100 кГц и выше. Эти данные хорошо соотносятся с результатами расчетов [3].

В заключение стоит отметить, что термостатированные генераторы, выпускаемые в России, ничем не уступают по качеству и характеристикам лучшим импортным образцам [4] и часто идут на экспорт. Обратная ситуация с простыми тактовыми и термокомпенсированными генераторами. Для их производства требуется высокая автоматизация, и в их составе используются специализированные микросхемы. Данные микросхемы российского производства сильно уступают по качеству импортным, и уровень автоматизации российских производств ниже. Учитывая большой объем потребления таких генераторов, актуальной является задача разработки и локализации производства таких микросхем.

Литература

1. Vig J. R. Quartz crystal resonators and oscillators. For frequency control and timing applications: A tutorial // USA, NS: Development & Engineering Center Fort Monmouth, 2000. 493 p.
2. Vig J. R., Walls F. L. Fundamental limits on the frequency instabilities of quartz crystal oscillators // Proceedings of IEEE 48th Annual Symposium on Frequency Control, 1994.
3. Ложников А. О., Лепетаев А. Н. Анализ фазовых шумов генераторов на основе расчета предельных уровней возбуждения кварцевых резонаторов различных срезов // Техника радиосвязи, 2020. — Вып. 3 (46).
4. Ложников А. О. Перспективные образцы кварцевых и СВЧ-генераторов для ответственных применений // Наноиндустрия, 2021. — Вып. S7 (107).

УДК 538.945

Нанoeлектроника на сверхпроводниках — челлендж или альтернатива

Пугач Н. Г.¹, к. ф.-м. н., Лекомцев Н. В.¹, Львов Б. Г.¹, д. т. н., Екомасов Е. Г.^{2,3}, д. ф.-м. н.

¹ Научно-исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
npugach@hse.ru

² Уфимский университет науки и технологий
450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

³ Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы
450008, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, 3-а

Быстро развивающееся направление сверхпроводниковой наноэлектроники, как часть наноэлектроники квантовых систем, призвано решать следующие задачи: энергосбережение, миниатюризация элементов, их быстродействие и, наконец, обеспечение работы принципиально нового типа устройств — квантовой логики.

Ключевые слова: сверхпроводимость; контакт Джозефсона; кубит; сверхпроводниковая электроника.

Одним из подходов к решению проблем энергосбережения и быстродействия современных наноэлектронных устройств после насыщения закона Мура видится переход от использования десятилетиями отработанных методов КМОП (комплемментарная структура металл — оксид — полупроводник) на сверхпроводящие материалы.

Нанoeлектроника на сверхпроводниках является новой перспективной областью электроники квантовых систем, которая появилась в конце XX века и активно развивается в последние годы. Сверхпроводимость обеспечивает макроскопические квантовые явления, такие как эффекты близости и Джозефсона. Это открывает привлекательную возможность реализации электронных устройств, работающих на квантовых принципах, при современном уровне развития нанотехнологии [1].

Законы квантового мира отличаются от классических, соотношения Джозефсона отличны от закона Ома, так и устройства сверхпроводниковой наноэлектроники принципиально отличаются от традиционных для КМОП-технологии. Это создает новый функционал таких устройств, включая квантовые компьютеры и симуляторы, а также искусственные нейросети [2]. Одни из основных механизмов работы их элементов базируются на использовании переноса кванта магнитного потока для хранения и обработки информации, реализованного в сверхпроводящих контурах при низкой температуре.

Эта новая область призвана решать следующие задачи: энергосбережение, миниатюризация элементов, их быстродействие и, наконец, обеспечение работы принципиально нового типа устройств — квантовой логики. Будет дан обзор существующих направлений развития сверхпроводниковой наноэлектроники, включая магнитную память, джозефсоновскую логику, кубиты и квантовые компьютеры. Основными хорошо разработанными на сегодняшний день элементами сверхпроводниковой спинтроники являются сверхпроводящие спиновые вентили. Будет



дан обзор этих разработок [3]. Будут обсуждаться перспективы и проблемы их применения в качестве совместимой магнитной памяти для сверхпроводниковых классических и квантовых логических устройств. В заключение расскажу о нашей последней разработке — сверхпроводниковых спиновых вентилях нового типа [4].

Работа выполнена при поддержке проекта «Зеркальные лаборатории» НИУ ВШЭ и Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы «Квантовые эффекты в низкоразмерных гибридных наноструктурах».

Литература

1. Holmes S. D., Pugach N. et al. International roadmap for devices and systems. Cryogenic electronics and quantum information processing. 2018 Update // IEEE USA, 2019. 67 p.
2. Скуратов М. И., Пугач Н. Г., Екомасов Е. Г., Львов Б. Г. Искусственные нейронные сети: базовые принципы и возможные реализации // Известия Уфимского научного центра РАН, 2022. — № 4. — С. 5–11.
3. Пугач Н. Г., Селезнёв Д. В., Львов Б. Г. Сверхпроводящая спинтроника — перспективное направление криогенной наноэлектроники // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8-2 (113). — С. 572–573.
4. Pugach N., Safonchik M. O., Belotelov V., Ziman T., Champel T. Superconducting Spin Valves Based on a Single Spiral Magnetic Layer // Physical Review Applied, 2022. Vol. 18. № 5. Article 054002.

УДК 53.083.98

Контроль параметров процессов в технологическом цикле производства КМОП ИС

Волоховский А. Д.

ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

info@nm-tech.org

В докладе приводится ряд базовых понятий, таких как объект измерения и его модель, границы допуска и контрольные границы, неопределенность измерения. Также доклад познакомит слушателей с методиками измерения, используемыми в технологическом цикле производства КМОП ИС, и методами статистического анализа обработки результатов.

Ключевые слова: интегральная схема; технологический процесс; контроль технологических процессов; микроэлектроника.

Процесс измерения может быть представлен операций

Модель процесса \otimes Модель структуры \rightarrow Результат измерения,

где параметр «Модель процесса» представляет модель измерительной операции, а «Модель структуры» — это модель описания измеряемой структуры. Модель измеряемой структуры необходимо выбирать так, чтобы определить объект измерения таким образом, как он нас интересует, и не учитывать те детали, которые являются неизвестными, незначительными либо являются слишком сложными для рассмотрения.

Ошибка измерения — это разница между результатом измерения и неизвестным настоящим значением. Неопределенность измерения есть доверительный интервал, представляющий дисперсию ошибок измерения. Неопределенность вызвана флуктуациями случайных параметров. Причины возникновения данных ошибок неизвестны либо неконтролируемы, так как в противном случае их можно было бы исключить.

Результат измерения есть вероятностное распределение случайных величин, которые можно охарактеризовать через среднее значение и дисперсию.

Тогда существует вероятность p_1 , которая меньше единицы, что измерение элемента, попавшее в границы допуска, на самом деле попало в границы допуска, и вероятность $(1 - p_1)$, что не попало. Аналогично существует вероятность p_2 , что измерение элемента, не попавшее в границы допуска, на самом деле не попало в границы допуска, и вероятность $(1 - p_2)$, что попало.

Предположим, что измерение производилось в целях проверки, удовлетворяет ли объект спецификации заказчика. Тогда существует стоимость c_{12} отгрузки несоответствующего спецификации объекта и стоимость c_{21} забракования объекта, который соответствует спецификации. Очевидно, $c_{21} < c_{12}$. Стоимость забракования несоответствующего объекта еще меньше, и стоимость поставки объекта, соответствующего спецификации, равна нулю. В общем, существует стоимость c_j действия над объектом i при условии, что он относится к категории измеряемого результата j , и p_j — вероятность того, что объект действительно принадлежит к категории j . При этом суммарная вероятность по всем категориям должна равняться единице:

$$\sum p_j = 1.$$

Тогда ожидаемая стоимость действия i будет равна

$$C_i = \sum c_{ij} p_j.$$

В табл. 1 приведены соотношения для случая решения о поставке/непоставке объекта на основе результата измерения. На рис. 1 графически изображены вероятности p и $(1-p)$.

Таблица 1. Ожидаемая стоимость принятия решения на основе данных измерения с достоверностью p

Действие, i	Стоимость действия, c_{ij} , при условии		Ожидаемая стоимость действия, C_i
	объект на самом деле соответствует спецификации	объект на самом деле не соответствует спецификации	
Поставка	c_{11}	c_{12}	$p c_{11} + (1-p) c_{12}$
Забракование	c_{21}	c_{22}	$p c_{21} + (1-p) c_{22}$

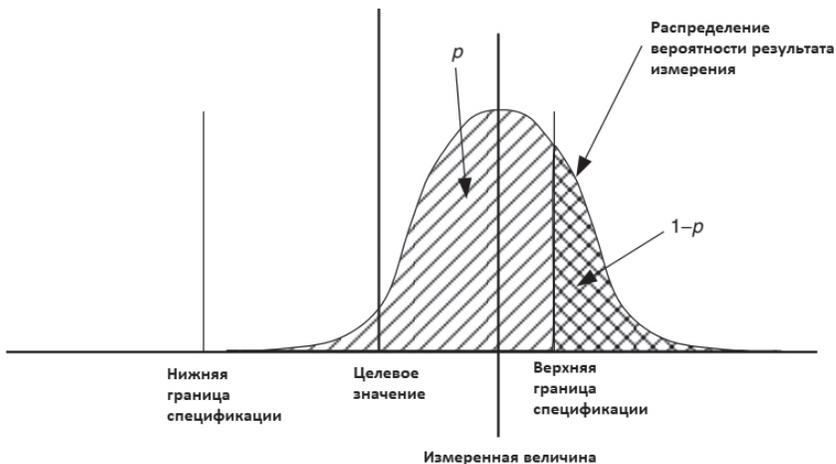


Рис. 1. Соотношения между целевым значением измеряемой величины, границами спецификации и распределением вероятности результата измерения

Для многих продуктов стоимость поставки некачественного продукта c_{12} выше остальных. Также само измерение имеет стоимость c_0 независимо от его результата. Тогда суммарная ожидаемая стоимость измерительной операции C_{NET} равна

$$C_{NET} = C_i + c_0.$$

Расширенная неопределенность U измерения прямо пропорциональна стандартному отклонению вероятностного распределения:

$$U = k\sqrt{\text{var}(x)},$$

где k — константа, выбираемая из таблицы для необходимого доверительного интервала, а $\text{var}(x)$ — дисперсия распределения вероятности величины x . Неопределенность измерения может быть снижена путем направления дополнительных ресурсов на выполнение измерительной операции, например, путем перехода на более точный и дорогостоящий тип средства измерения. Таким образом, стоимость измерительной операции c_0 тем выше, чем ниже неопределенность измерения:

$$c_0 \propto 1/U.$$

В производственном цикле проведение измерения имеет смысл, если стоимость полученных данных превосходит стоимость проведения измерения. Целью измерения является определение того, какое действие приведет к минимизации полной ожидаемой стоимости ($C_i + c_0$).

В докладе будет также приведен обзор методов, применяемых в технологическом цикле производства КМОП ИС для измерения толщин, линейных размеров, концентраций и других технологических параметров, а также краткий обзор методов статистической обработки полученных данных.



УДК 621.3.049

Исследование процессов дефектообразования в эпитаксиальных гетероструктурах методами высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии

Фалеев Н. Н.¹, Maros A.², Zhang C.², Gangopadhyay A.³, Smith D. J.⁴, Honsberg C. B.²

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
nfaleev@mail.ioffe.ru

² School of Electrical, Computer and Energy Engineering, Arizona State University Tempe, AZ 85287, USA

³ School for Engineering of Matter, Transport and Energy, Arizona State University Tempe, AZ, 85287, USA

⁴ Department of Physics, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA

Высокоразрешающими методами рентгеновской дифрактометрии (РД) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследованы процессы дефектообразования в эпитаксиальных гетероструктурах различного типа. Показано, что механизм формирования и взаимодействия дефектов в объеме эпитаксиальных структур определяется структурой интерфейсов, формируемой на начальной стадии роста.

Ключевые слова: высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия; просвечивающая электронная микроскопия; эпитаксиальные гетероструктуры; кристаллические дефекты.

Кристаллические дефекты в гетероэпитаксиальных структурах и механизм их формирования являются серьезной проблемой в силу большого влияния дефектов на физические параметры будущих приборов. Механизм формирования дефектов в процессе роста систематически не исследован, объяснение наблюдаемых эффектов в рамках классической термодинамики некорректно и требует дополнительной проработки.

Структурные исследования полярных/полярных $\{\text{GaAs-GaAsSb-GaAs}(001)\}$ [1–3] и полярных/неполярных $\text{GaP-Si}(001)$ [4] гетероструктур выявили общие структурные закономерности и отличия механизмов формирования дефектов.

Процесс релаксации проходит в три этапа: начальный — докритический медленный, лавинный — быстрый и финальный — посткритический медленный. Графики показывают изменение степени релаксации в слоях и плотности винтовых дислокационных сегментов в объеме эпитаксиальных слоев.

Начальная стадия роста — релаксация 1–3%, низкая плотность дислокаций в структурах ($\max \sim 10^4/\text{см}$). Вследствие квантовомеханической природы дефектообразования вероятность появления дислокаций и начала релаксации есть величина малая, но конечная. (Пример — *туннельный переход в полупроводниках*.) При этом незначительное отличие энергии образования дислокаций в плоскостях $\{110\}$ и $\{1-10\}$ может привести к заметному различию плотности дислокаций (\sim в пять

раз в пол./пол. структурах). Образование дефектов не приводит к существенному разрушению кристаллического совершенства структур и потере пространственной когерентности слоев. Переход от начальной к лавинной стадии роста, от одноосной анизотропии к изотропно напряженной проходит через формирование доменной структуры в объеме слоя.

Лавинная стадия роста — достижение критической толщины слоя, экспоненциальное увеличение плотности дислокаций, стабилизация упругой энергии слоя на критическом уровне, формирование единого деформационного поля и разрушение пространственной когерентности в объеме слоя. Критическую толщину слоя следует определить как толщину, при которой начинается лавинное образование дефектов и резко растет релаксация упругой деформации в слое.

Финальная стадия роста — уменьшение упругой энергии слоя, замедление процесса дефектообразования. В пол./пол. структурах уменьшение объемной упругой деформации слоев является следствием *компенсационного взаимодействия винтовых компонент 60° дислокаций в объеме слоев. Формируются устойчивые дислокационные пары по типу дислокаций Ломера в синхорассогласованных структурах.*

Структура интерфейсов влияет на тип, плотность и взаимодействие дефектов. В исследованных пол./пол. структурах локализация основных дефектов (60° диссоциированные дислокации) на интерфейсах допускает пространственное перекрытие и взаимодействие их деформационных полей в процессе роста.

В пол./непол. структурах дефекты случайным образом распределены в объеме слоев, взаимодействие в объеме незначительно, компенсационного эффекта нет. Дислокации несоответствия образуются при взаимодействии прорастающих линейных дефектов: доменных стенок, дефектов упаковки/микродвойников, образовавшихся на интерфейсе на ранней стадии роста.

Литература

1. Maros A., Faleev N., King R. R., Honsberg C. B., Convey D., Xie H., Ponce F. A. Critical thickness investigation of MBE-grown GaInAs/GaAs and GaAsSb/GaAs heterostructures // J. Vac. Sci. Technol. B 34, 02L113 (2016); DOI: 10.1116/1.4942897.
2. Gangopadhyay A., Maros A., Faleev N., Smith D. J. Atomic structure of dissociated 60° dislocations in GaAs/GaAs_{0.92}Sb_{0.08}/GaAs heterostructures // Scripta Materialia, 153 (2018), 77–80.
3. Gangopadhyay A., Maros A., Faleev N., Smith D. J. Strain relaxation in low-mismatched GaAs/GaAs_{1-x}Sb_x/GaAs heterostructures // Acta Materialia, 162 (2019), 103–115.
4. Zhang C., Boley A., Faleev N., Smith D. J., Honsberg C. B. Investigation of defect creation in GaP/Si(0 0 1) epitaxial structures // Journal of Crystal Growth, 503 (2018), 36–44.



УДК 621.3.049

Магнитная память с произвольным доступом к данным, управляемая с помощью зарядовых токов, SOT-MRAM

К. ф.-м. н. Давыденко А. В., к. ф.-м. н. Козлов А. Г., Базров М. А.,
Намсараев Ж. Ж., Летушев М. Е., Черноусов Н. Н., Турпак А. А.

*ДВФУ, Лаборатория пленочных технологий
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
davydenko.av@dyfu.ru*

Приведены физические принципы работы устройств записи информации, основанных на изменении магнитного состояния наносистем вследствие переноса углового момента от кристаллической решетки слоев с сильным спин-орбитальным взаимодействием в магнитные слои с помощью электронов проводимости (spin-orbit torque или SOT-эффект).

Ключевые слова: магнитная память с произвольным доступом к данным; сдвиговая магнитная память; перенос углового момента током.

На сегодняшний день человечеству требуется хранить и оперировать все большими объемами информации. Постоянно идет поиск новых типов памяти, сочетающих в себе высокое быстродействие, энергоэффективность, энергонезависимость и экономическую рентабельность. Потенциальными кандидатами на замещение существующей оперативной и кэш-памяти являются магнитные типы памяти с произвольным доступом к данным, основанные на SOT-эффекте (SOT-MRAM) [1].

Метод управления намагниченностью с помощью SOT-эффекта превосходит другие (перенос углового момента от тока, проходящего сквозь магнитные слои, — STT-эффект и поле Эрстеда) по скорости, эффективности, долговечности и универсальности, что делает его привлекательным с научной и промышленной точек зрения. Тем не менее в настоящее время устройства SOT все еще страдают от:

- 1) высокого энергопотребления;
- 2) требования наличия продольного магнитного поля;
- 3) проблем совместимости с существующими технологиями изготовления электронных устройств.

Для решения вышеперечисленных проблем производится поиск новых материалов и систем материалов, обладающих большим значением SOT-эффективности. При этом устройства должны демонстрировать бесполеное перемагничивание под действием импульсов тока.

Рассмотрены перспективные материалы и системы материалов в качестве источников спиновых токов в устройствах SOT-MRAM. Приведены подходы, позволяющие реализовать бесполеное переключение намагниченности в SOT-MRAM. Обсуждено потенциальное применение SOT-эффекта в различных устройствах: MRAM, сдвиговой магнитной памяти, приборах магнитной логики и нейроморфных вычислителях. Указаны проблемы, возникающие при масштабировании магнитных элементов до латеральных размеров, соответствующих десяткам нанометров.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России по государственному заданию (проект № FZNS-2023-0012).

Литература

1. Zhu L. Switching of Perpendicular Magnetization by Spin–Orbit Torque // *Advanced Materials*, 2023. Vol. 35. P. 2300853.



УДК 004.8, 004.31

Перспективы развития нейроморфных процессоров для систем искусственного интеллекта

Логунов М. В.^{1,2}

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
logunov@cplire.ru*

² *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

В докладе рассмотрены задачи, для решения которых необходимы системы искусственного интеллекта, а также современное состояние и перспективы развития нейроморфных процессоров для таких систем.

Ключевые слова: системы искусственного интеллекта; нейроморфные процессоры.

Значительный прогресс, достигнутый в последние годы в области развития систем искусственного интеллекта, оказывает все возрастающее влияние не только на развитие информационных технологий и на многие отрасли промышленности, но и в целом на развитие общества. В данном докладе рассмотрены задачи, для решения которых необходимы системы искусственного интеллекта, а также современное состояние и перспективы развития нейроморфных процессоров для таких систем [1–5]:

- производство процессоров на базе кремниевой микроэлектроники с архитектурой, адаптированной к эффективному выполнению нейроморфных вычислений;
- готовность к производству процессоров на базе кремниевой микроэлектроники с технологией прямой интеграции энергонезависимой быстродействующей магнитной памяти в архитектуру процессора;
- разработка и пилотные образцы магниторезистивной оперативной памяти со случайным доступом, в которой функции энергонезависимого хранения данных и вычислений в оперативной памяти объединены в одной микросхеме;
- перспективные разработки нейроморфных процессоров на основе эффектов спинтроники и интерфейсов спин-фотоники в целях многократного повышения энергоэффективности и быстродействия систем искусственного интеллекта.

Литература

1. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Том 1. — Вильямс, 2021. — 704 с.
2. Processing-in-Memory for AI. From Circuits to Systems / Editors: J.-Y. Kim, B. Kim, T. T.-H. Kim // Springer, 2023. 165 p.
3. Yusuf A., Adegbija T., Gaiaria D. Domain-Specific STT-MRAM-Based In-Memory Computing: A Survey // IEEE Access, 2024. Vol. 12. P. 28036.

4. Вилков Е. А., Сафонов С. С., Темирязов А. Г. и др. Исследование свойств магнитооптических пленок и пленочных наноструктур для интегрально-оптических невзаимных устройств межсоединений верхнего уровня УБИС // Вестник РФФИ, 2023. — № 2 (118). — С. 141–151.
5. Zhang Y., Feng X., Zheng Z. et al. Ferrimagnets for spintronic devices: From materials to applications // Applied Physics Reviews, 2023. Vol. 10. P. 011301.



УДК 681.5.015

Интервальные модели динамических систем

К. ф.-м. н. Морозов А. Ю., д. ф.-м. н. Абгарян К. К., д. ф.-м. н. Ревизников Д. Л.
ФИЦ ИУРАН

119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2

morozov@infway.ru, kristal83@mail.ru, reviznikov@gmail.com

При решении различных прикладных и исследовательских задач часто возникают ситуации, когда какие-либо данные точно неизвестны, но есть информация о диапазонах, в которых находятся их значения. Подобные задачи нередко встречаются в области моделирования электронных компонентов, которые могут быть описаны динамическими системами с интервальными параметрами. В частности, яркими представителями в этой области являются мемристоры, так как их характеристики могут отличаться от измерения к измерению, от экземпляра к экземпляру и т. д. В работе представляется подход к моделированию динамических систем, который позволяет получить ограничения сверху и снизу на интересующие величины.

Ключевые слова: алгоритм адаптивной интерполяции; интервальная параметрическая идентификация; интервальные модели; мемристор.

Для задач с неопределенностями актуально получение интервальных оценок интересующих величин по известным исходным интервальным данным. Применительно к прямым задачам речь идет о нахождении интервальных оценок решения по интервальным значениям параметров, а применительно к обратным задачам — об определении интервальных оценок параметров, при которых соответствующее интервальное решение содержало бы в себе экспериментальные данные. Разработанный подход основан на адаптивной интерполяции с использованием kd-деревьев [1], разреженных сеток [2] и тензорных поездов [3]. Данный подход позволяет получить в явном виде зависимость решения прямой задачи от значений параметров из заданных интервалов с контролируемой точностью. С помощью предложенного подхода решен ряд актуальных прикладных и исследовательских задач с интервальными параметрами из области вычислительного материаловедения, химической кинетики, небесной механики, микроэлектроники и других областей, включая задачи, содержащие дробно-дифференциальные уравнения с интервальными параметрами в показателе производных, и задачи моделирования динамических систем, в которых имеют место бифуркации и динамический хаос.

Наиболее ярким примером из области микроэлектроники является задача моделирования мемристивных элементов с учетом разброса их вольт-амперных характеристик. Большинство известных компактных моделей мемристора сформулированы в виде динамической системы относительно параметра состояния мемристора. Параметр состояния мемристора — это величина, которая соответствует положению границы, разделяющей области с низкой и высокой концентрацией вакансий кислорода, толщине проводящего слоя или толщине непроводящего барьера, в котором возникает туннельный ток электронов.

Согласно экспериментальным данным, характер функционирования мемристоров является отчасти стохастическим, о чем свидетельствует разброс в вольт-амперных характеристиках в процессе переключения из высокоомного состояния

в низкоомное состояние и наоборот. Зачастую существующие математические модели мемристоров не в полной мере воспроизводят эксперимент.

Можно использовать интервальный аппарат для учета разброса характеристик элементов [4]. Идея заключается в добавлении в математическую модель интервальных параметров. В этом случае результатом имитационного моделирования в каждый момент времени будут являться интервальные оценки фазовых переменных. Значения интервальных параметров подбираются таким образом, что полученные оценки полностью содержат экспериментальные данные. Для этого строится целевая функция (и ее градиент) в пространстве границ интервальных параметров модели, характеризующая отклонение модельных интервальных оценок фазовых переменных от экспериментальных данных, и выполняется ее минимизация [5].

В контексте моделирования мемристивных элементов зависимость тока от параметра состояния и приложенного к элементу напряжения может быть довольно сложной, и за счет правильного выбора соответствующего аппроксиматора, включающего интервальные параметры, можно добиться хорошего согласования модели и эксперимента [6].

К ключевым особенностям предложенного подхода относится то, что он позволяет получить модели, которые дают ограничения сверху и снизу на интересующие величины. Эффективность подхода продемонстрирована на задаче распознавания изображений с помощью аналоговой нейроморфной системы на основе мемристорного кроссбара, в котором содержалось порядка 80000 мемристоров.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект № 23-91-01012).*

Литература

1. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева для численного интегрирования систем ОДУ с интервальными начальными условиями // Дифференциальные уравнения, 2018. — Т. 54. — № 7. — С. 963–974. DOI: 10.1134/S0374064118070130.
2. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм адаптивной интерполяции на разреженных сетках для численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными неопределенностями // Дифференциальные уравнения, 2021. — Т. 57. — № 7. — С. 976–987. DOI: 10.31857/S0374064121070104.
3. Гидаспов В. Ю., Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм адаптивной интерполяции с использованием ТТ-разложения для моделирования динамических систем с интервальными параметрами // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2021. — Т. 6. — № 9. — С. 1416–1430. DOI: 10.31857/S0044466921090106.
4. Morozov A. Yu., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Interval Model of a Memristor Crossbar Network // Physica status solidi (b), 2022. Vol. 269. Is. 11. 2200150.
5. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм подвижного окна для параметрической идентификации динамических систем с прямоугольными и эллипсоидными областями неопределенности параметров // Дифференциальные уравнения, 2023. — Т. 59. — № 6. — С. 814–827. DOI: 10.31857/S0374064123060110.
6. Abgaryan K. K., Morozov A. Yu., Reviznikov D. L. Hybrid Approach for Modeling Memristive Elements // Physica status solidi (b), 2024. 2400058.



УДК 621.38:57.08

Новые подходы к созданию компонентов для биоэлектроники

Герасименко А. Ю.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
gerasimenko@bms.zone*

Разработаны новые подходы и материалы для создания биоэлектронных компонентов. Приведены результаты моделирования и формирования углеродных наноматериалов с управляемыми структурными, механическими и электрофизическими характеристиками для изготовления электропроводящих топологий в интегральных схемах, полевых катодов, стимуляторов электрогенных клеток и тканей, а также кардиоимплантатов.

Ключевые слова: нанокompозиты; углеродные каркасные наноматериалы; гибкая электроника; диагностика; терапия.

Ввиду нарастающего развития электронной компонентной базы возникает необходимость разработки новых материалов и подходов формирования топологий. В последнее время электронные приборы широко используются в медицине для диагностики и терапии социально значимых заболеваний. Особенно активно развивается имплантируемая миниатюрная микроэлектроника. Однако в настоящий момент традиционные твердотельные микроэлектронные технологии сталкиваются с проблемой несовместимости кремниевых чипов с биологическими тканями организма. К основным перспективным материалам для современных электронных компонентов относятся аллотропные формы наноуглерода — нанотрубки и графен, структурные свойства которых обеспечивают управляемые электрофизические, оптические и механические свойства [1]. Обе формы наноуглерода способны выдерживать высокие плотности тока $\sim 10^9$ А/см², высокую теплопроводность на уровне 5300 Вт/м·К и обладают высокой прочностью и жесткостью (модуль Юнга 1,0 ТПа и предел прочности 130 ГПа). Такие характеристики углеродных нанотрубок и графена делают их многообещающими кандидатами не только для функциональных компонентов твердотельной электроники, но и для создания гибких тонкопленочных транзисторов, электропроводников, накопителей энергии, которые превосходят кремниевую электронику.

На основе выявленных особенностей взаимодействия углеродных нанотрубок и графена с лазерным излучением предложен новый подход к изготовлению кремниевых электронных и биоэлектронных устройств. Подход основан на том, что одномерные и двумерные углеродные наноматериалы, к которым относятся углеродные нанотрубки и графен, за счет малого размера и особенной структуры в виде моноатомных слоев с ковалентно связанными атомами в гексагональные кольца имеют большую величину удельной поверхности при значительной гибкости и прочности. Углеродные наноматериалы могут проявлять полупроводниковые или металлические свойства с высокой подвижностью заряда и регулируемой электропроводностью. Такими же свойствами может быть наделен трехмерный

биосовместимый материал на основе наноструктур из углеродных нанотрубок, графена и их гибридов в полимерной или биополимерной матрице. Лазерное излучение стимулирует образование контактов между нанотрубками и графен-нанотрубных контактов, что приводит к созданию новых электропроводящих конструкций для создания полевых автоэмиссионных катодов, межсоединений с различными топологиями для интегральных схем, тензодатчиков для детектирования движений, интерфейсов для электростимуляции роста клеток и электропроводящих тканеинженерных конструкций и других компонентов [2–6].

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Pyo S., Eun Y., Sim J. et al. Carbon nanotube-graphene hybrids for soft electronics, sensor. and actuators // *Micro and Nano Syst Lett.*, 2022. Vol. 10. № 9.
2. Gerasimenko A. Yu. et al. Hybrid Carbon Nanotubes–Graphene Nanostructures: Modeling, Formation, Characterization // *Nanomaterials*, 2022. Vol. 12. № 16. P. 2812.
3. Slepchenkov M. M., Gerasimenko A. Yu., Kuksin A. V. et al. Electrophysical properties of laser-structured carbon nanomaterials functionalized with LaB6 nanoparticles // *Diamond and Related Materials*, 2023. Vol. 140. P. 110512.
4. Nikitina N. A., Ryabkin D. I., Suchkova V. V., Kuksin A. V., Selishchev S. V., Gerasimenko A. Yu. et al. Laser-Formed Sensors with Electrically Conductive MWCNT Networks for Gesture Recognition Applications // *Micromachines*, 2023. Vol. 14. № 6. P. 1106.
5. Gerasimenko A. Yu. et al. Interfaces Based on Laser-Structured Arrays of Carbon Nanotubes with Albumin for Electrical Stimulation of Heart Cell Growth // *Polymers*, 2022. Vol. 14. № 9. P. 1866.
6. Gerasimenko A. Yu. et al. Laser fabrication of composite layers from biopolymers with branched 3D networks of single-walled carbon nanotubes for cardiovascular implants // *Composite Structures*, 2021. Vol. 260. P. 113517.



УДК 537.9

Сверхгибкая сегнетоэлектрическая память на биосовместимой платформе

К. ф.-м. н. Чуприк А. А.

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
chouprik.aa@mipt.ru

В работе представлены результаты разработки сверхгибких и растяжимых устройств памяти на основе пленки $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ толщиной 10 нм, изготовленных по технологии, предусматривающей инкапсуляцию устройств в упаковку из биосовместимого органического материала (полиимида). Устройства демонстрируют высокие механические и электрические характеристики. Результаты экспериментального исследования влияния механических напряжений на функциональные свойства подтверждены теоретическими расчетами.

Ключевые слова: гибкая электроника; энергонезависимая память; сегнетоэлектрическая память; оксид гафния.

Гибкая электроника обладает большим потенциалом для изменения жизни человека в сторону большего удобства и здоровья. Значительные усилия направлены на разработку технологий и устройств для гибких гаджетов, электронного текстиля, носимых устройств и ряда приложений для здравоохранения, включая медицинские датчики, размещаемые на коже человека, и медицинские имплантируемые устройства [1]. Следующее поколение медицинских и носимых электронных устройств, непосредственно контактирующих с телом человека, требует разработки гибких активных элементов на биосовместимой платформе, потенциально микроконтроллеров, включая энергонезависимую память для хранения данных. В настоящее время рассматривается несколько концепций гибкой энергонезависимой памяти. Одними из наиболее привлекательных концепций являются сегнетоэлектрические запоминающие устройства благодаря их высокой скорости, низкому энергопотреблению и высокому ресурсу.

Тонкие поликристаллические сегнетоэлектрические пленки HfO_2 имеют большой потенциал для разработки гибких сегнетоэлектрических запоминающих устройств, поскольку они обладают сегнетоэлектрическими свойствами, будучи очень тонкими (4–30 нм) [2], и, следовательно, ожидается, что при изгибе внутренние механические напряжения должны быть малы. В данной работе продемонстрированы сверхгибкие и растяжимые устройства памяти на основе пленки $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ толщиной 10 нм, изготовленные по инновационной технологии, предусматривающей инкапсуляцию устройств в упаковку из биосовместимого органического материала (полиимида) [3]. Устройства демонстрируют большое окно памяти (остаточная поляризация 27 мКл/см²) и выдерживают экстремальные механические условия, включая складывание пополам (радиус изгиба 0,5 мм), многократный изгиб до 150 000 циклов изгиба и более, растяжение с нагрузкой до 1,5 кг и не менее 900 циклов растяжения. Далее данные гибкие устройства были использованы в качестве платформы для исследования фундаментальной роли механического напряжения в природе сегнетоэлектричества в оксиде гафния как экспериментально, так

и теоретическим путем. Прямой *in situ* эксперимент показал, что механическое напряжение вызывает обратимые изменения спонтанной поляризации, коэрцитивного напряжения, диэлектрической проницаемости и проводимости. С помощью теоретических квантовомеханических расчетов была установлена роль механического напряжения в сегнетоэлектрических и диэлектрических свойствах оксида гафния.

В прикладном плане данная работа может заложить основу для реализации биосовместимой высокопроизводительной гибкой сегнетоэлектрической памяти, а в области фундаментальных основ сегнетоэлектрических материалов она позволяет понять критическую роль остаточного механического напряжения, неизбежно присутствующего в тонких сегнетоэлектрических пленках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00370, <https://rscf.ru/project/20-19-00370/>).

Литература

1. Herbert R., Kim J.-H., Kim Y. S., Lee H. M., Yeo W.-H. Soft material-enabled, flexible hybrid electronics for medicine, healthcar. and human-machine interfaces // *Materials*, 2018. Vol. 11. P. 187.
2. Böске T. S. et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // *Applied Physics Letters*, 2011. Vol. 99. № 10.
3. Chouprik A., Mikheev V., Margolin I., Kalika E., Spiridonov M., Negrov D. Superflexible and Stretchable Ferroelectric Memory on a Biocompatible Platform // *Advanced Electronic Materials*, 2024. Vol. 10. № 2300449.



УДК 615.47:612.746.4

Распознавание и классификация паттерна физиологического тремора с помощью акселерометрии в системе анализа мышечного утомления и восстановления умного костюма Muscles.AI

Селезнева Л. Г.¹, Улыбин В. В.²

¹ ООО «Институт детской и взрослой неврологии и эпилепсии имени Святого Луки»

119571, г. Москва, ул. Академика Анохина, 9
ludmila-2277@mail.ru

² ООО «МАСКЛАИ»

420500, г. Иннополис, ул. Университетская, 5, пом. 111
v.ulybin@gmail.com

Создана база данных физиологического тремора и разработана ML-модель, выполняющая распознавание и классификацию паттерна физиологического тремора верхних и нижних конечностей, измененного под влиянием физической нагрузки, в потоке данных нательного инерциального измерительного датчика.

Ключевые слова: мышечное утомление; тремор; инерциальная измерительная система; акселерометр; машинное обучение; носимые устройства; спорт высших достижений; реабилитация.

Отсутствие возможности объективно оценить мышечное утомление во время физических тренировок или двигательной реабилитации снижает их эффективность и повышает риски травматизма. Оценка утомления преимущественно субъективна, а методы объективной диагностики в основном сосредоточены на анализе напряжения кардиореспираторной системы. Применение умных аппаратно-технических систем с машинным анализом информации инерциальных измерительных систем актуально и имеет значительные преимущества в объективизации оценки движений человека и состояния его опорно-двигательного аппарата.

Мышечное утомление — распространенная причина усиления физиологического тремора во время и после физической нагрузки. Физиологический тремор визуально не определяется, но выявляется инструментально, имеет частоту 8–12 Гц, становится заметным при выполнении точных движений, длительном поддержании позы, стрессе, утомлении, гипертиреозе и приеме некоторых препаратов [1, 2].

Целью нашего исследования стала разработка ML-модели, выполняющей распознавание и классификацию паттерна тремора верхних и нижних конечностей в потоке данных нательного инерциального измерительного датчика: в статической нагрузке, в покое до и после нагрузки.

Практическая часть исследования включала регистрацию тремора IMU-сенсором на девять степеней свободы Bosch BMX055 согласно разработанному протоколу эксперимента и формирование базы данных физиологического тремора, получившей регистрацию Роспатента, анализ и препроцессинг данных тремора, разработку ML-моделей для решения задачи распознавания и классификации тремора.

Запись данных тремора осуществлялась в течение не менее 3 мин. в каждом из трех состояний с руки и с ноги. Место установки датчика на руке — на дистальной трети предплечья, на ноге — на дистальной трети голени. Целевой эффект физической нагрузки — достижение значительного утомления (не менее 5–6 баллов по модифицированной шкале Борга 0–10 баллов) и визуально — появление и усиление тремора конечности.

Выборка представлена 55 взрослыми условно здоровыми добровольцами (30 добровольцев имели регулярные физические нагрузки и 25 — тренировались нерегулярно).

Результатом работы стали классические ML-модели и сверточно-рекуррентная нейронная сеть, продемонстрировавшие точность около 80% классификации паттерна тремора верхних и нижних конечностей в покое до нагрузки, в нагруженном состоянии и после. Цель исследования достигнута созданием модели распознавания паттерна тремора в трех состояниях. Подтверждены гипотезы настоящего исследования:

- с помощью нательного инерциального измерительного датчика может быть выявлен паттерн тремора верхних и нижних конечностей. Частотные характеристики тремора, полученные с помощью нательного инерциального измерительного датчика, сопоставимы с имеющимися данными о физиологическом треморе в научных литературных источниках;
- физиологический тремор изменяется под влиянием мышечного утомления, что позволяет ML-модели эффективно классифицировать тремор.

Предложен алгоритм интерпретации классов тремора в оценке утомления и восстановления мышц после физической нагрузки в пользовательском приложении «Умный костюм»: измерение тремора в покое перед физической активностью, повторно между упражнениями и по завершении тренировки.

Состоятельность методов машинного обучения в распознавании тремора, изменяющегося при мышечном утомлении, подтверждает целесообразность проведения будущих исследований в целях разработки комплексной модели оценки утомления организма и выделения специфических для разного уровня мышечного утомления характеристик тремора.

Литература

1. Bhatia K. P. et al. Consensus Statement on the classification of tremors. from the task force on tremor of the International Parkinson and Movement Disorder Society // *Movement disorders*, 2018. Vol. 33. № 1. P. 75–87.
2. Raethjen J. et al. Determinants of physiologic tremor in a large normal population // *Clinical neurophysiology*, 2000. Vol. 111. № 10. P. 1825–1837.



УДК 621.315.592

Преимущества и недостатки ВЧ и СВЧ методов регистрации спада фотопроводимости для определения рекомбинационного времени жизни носителей заряда в кремнии

Кобелева С. П.^{1,2}, Анфимов И. М.², Юрчук С. Ю.¹, Щемеров И. В.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» 119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1*

² *ООО «РИИС»*

119049, г. Москва, Крымский вал, 3

kob@misis.ru

Рассмотрены принципы регистрации спада фотопроводимости в полупроводниковых материалах методами ВЧ и СВЧ для определения рекомбинационного времени жизни свободных носителей заряда в монокристаллическом кремнии. Показано, что емкостной ВЧ метод обладает рядом преимуществ, в первую очередь при регистрации больших (выше 1 мс) рекомбинационных времен.

Ключевые слова: монокристаллический кремний; спад фотопроводимости; рекомбинационное время свободных носителей заряда.

Введение

Рекомбинационное время жизни свободных носителей заряда (τ) в непрямозонных полупроводниках является уникальным параметром по величине которого можно судить о степени чистоты материала. Так в монокристаллическом кремнии при удельном электросопротивлении (ρ) выше 1 Ом см доминирует рекомбинация через глубокие центры, величина τ при этом обратно пропорциональна концентрации этих центров N_r . При $N_r \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ $\tau \sim 10$ мкс и это дает уникальную возможность контролировать концентрации центров ниже 10^{11} см^{-3} никакими другими методами не детектируемые, тем более в условиях промышленного производства. Поэтому τ является вторым марочным параметром для кремния и германия после ρ . Метод измерения τ много [1]. Для непрямозонных материалов с достаточно большими временами жизни (больше 10 мкс) предпочтительным являются методы, основанные на регистрации спада фотопроводимости (ФП). Они в свою очередь делятся на контактные и бесконтактные. Для производства используют бесконтактные методы, которые не требуют специальной подготовки образцов и создания омических контактов к образцам. В систему международных стандартов SEMI включен метод регистрации спада ФП СВЧ методом [2]. Метод регистрирует спад концентрации неравновесных носителей заряда, созданных импульсами засветки. Вторым бесконтактным методом является ВЧ метод, в котором регистрируется изменение проводимости образца при помещении образца в индуктивный или емкостной ВЧ контур. Индуктивный применяется для измерения образцов с $\rho < 100$ Омсм, т.е. для кремния, выращенного методом Чохральского, емкостной — для материала, выращенного методом БЗП. В работе анализируются емкостной ВЧ метод и СВЧ метод для анализа материалов с $\tau > 100$ мкс.

Факторы, влияющие на погрешность измерения рекомбинационного времени жизни

Главной проблемой при измерении τ по спаду ФП является влияние поверхностной рекомбинации на кривую спада. Релаксационная кривая будет представлять экспоненту с характерным параметром τ только при условии однородной генерации и отсутствии рекомбинации на поверхности. В связи с этим в [2] требуется измерять τ только на пассивированных образцах. Неоднородность генерации приводит к искажению начального участка кривой спада и стандарт рекомендует рассчитывать τ на второй половине релаксационной кривой. Учитывают поверхностную рекомбинацию как граничное условие при решении уравнения непрерывности, принимая, что на обоих гранях образца — освещенной и противоположной — поток носителей прямо пропорционален величине избыточной концентрации на поверхности. При этом коэффициент пропорциональности имеет размерность скорости и называется скоростью поверхностной рекомбинации S . Наличие поверхностной рекомбинации приводит к появлению «быстрых» экспонент, которые влияют на релаксационную кривую на первых этапах релаксации. Аналитическое решение уравнения непрерывности затруднено, в частности практически невозможно рассчитать вклад отдельных поверхностных экспонент, поэтому уравнение непрерывности в одномерном варианте решали численным методом [3]. Было показано, что на сколько долго будет замечен этот вклад зависит от степени однородности генерации. При этом существует максимальное значение «поверхностного» времени жизни τ_s , которое и приводят в учебниках для оценки вклада поверхностной рекомбинации [1]:

$$T_s = \frac{d^2}{\pi^2 D} + \frac{d}{2S} \quad \text{и} \quad \frac{1}{T_{\text{эф}}} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T_s}, \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии неосновного носителя заряда в образце, d — толщина образца.

Формулы (1) описывают релаксационную кривую как в ВЧ, так и СВЧ установках, но возникает и общая проблема — на каком участке релаксационной кривой рассчитывать $\tau_{\text{эф}}$. Далее в работе используется рекомендация [2], где предложено рассчитывать $\tau_{\text{эф}}$ на участке от 45 до 5% от начальной интенсивности сигнала спада ФП.

Существенным отличием ВЧ и СВЧ установок является наличие скин-слоя при поглощении СВЧ волны материалом, величина которого зависит как от частоты генерации СВЧ волны, так и от проводимости образца. Для частот генерации в 10–30 ГГц размер скин-слоя для проводящих образцов может составлять миллиметры и если его размер сопоставим с диффузионной длиной L , это заметно искажает релаксационную кривую и приводит к занижению измеренных значений τ .

Существует два типа СВЧ детекторов для регистрации сигнала ФП. Первый, предложенный в [2], предполагает достаточно широкую площадку контакта образца с СВЧ-трактом. В [4, 5] предложен другой тип СВЧ детектора. Это детекторы т. н. кольцевого типа, в которых контакт образца с СВЧ-трактом ограничен достаточно узким, 3–5 мм размером кольцевого зазора, который дополнительно искажает сигнал в случае, когда L имеет тот же порядок величины. Это можно учесть при расчетах τ численными методами, но погрешность при этих оценках возрастает, в частности нельзя пользоваться формулами (1).



В ВЧ методе таких ограничений нет. До значений объемного τ порядка 500 мкс и толщин образцов в интервале до 5L для всех типов установок можно использовать (1), но при значениях выше 500 мкс в СВЧ установках погрешность расчетов объемного τ по (1) может превышать 20 %, что делает ВЧ метод, помимо более простой аппаратной реализации прибора, преимущественным.

Заключение

Для измерения τ в образцах с неpassивированными поверхностями при толщинах образцов в интервале 1–5 диффузионных длин и τ выше 500 мкс ВЧ метод имеет преимущества, связанные с меньшим влиянием параметров ВЧ детекторов на результаты измерений релаксационной кривой.

Литература

1. Кобелева С. П. Методы измерения электрофизических параметров монокристаллического кремния. Ч. 2 // Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам, 2013. — № 8. — С. 15–27.
2. SEMI M F1535. Standard Test Methods for Carrier Recombination Lifetime in Silicon Wafers by Noncontact Measurement of Photoconductivity Decay by Microwave Reflectance // SEMI annual book, 2007. P. 8274–8293.
3. Юрчук С. Ю., Кобелева С. П. Расчет профилей распределения фотогенерированных носителей заряда в полупроводнике и фотопроводимости // Свидетельство о гос. Регистрации программы ЭВМ № 2013612971 от 19 марта 2013 г.
4. Ахманаев В. Б., Лисюк Ю. В., Медведев Ю. В., Петров А. С. Измерение скорости поверхностной рекомбинации и времени жизни носителей заряда в полупроводниках бесконтактным СВЧ-резонаторным методом // Известия вузов. Физика, 1983. — Вып. 6. — С. 79.
5. Кобелева С. П., Анфимов И. М., Шемеров И. В. Прибор для измерения рекомбинационного времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках // Приборы и техника эксперимента, 2016. — № 3. — С. 91–95.

Влияние параметров атомно-слоевого осаждения на количество проводящих филаментов в мемристорных структурах на основе оксида гафния

Исаев А. Г.^{1,2}, Пермякова О. О.¹, к. ф.-м. н., Мягоньких А. В.¹, к. ф.-м. н., Рогожин А. Е.¹

¹ Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

isaev.ag@phystech.edu

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

При помощи АСМ с измерением проводимости исследовался процесс резистивного переключения в структурах на основе оксида гафния, сформированных при различных параметрах ALD. Показано, что для различных типов ALD существует оптимальная температура осаждения, при которой число филаментов максимально.

Ключевые слова: мемристор; резистивное переключение; атомно-слоевое осаждение.

Резистивная память с произвольным доступом (ReRAM) [1] является одним из наиболее перспективных кандидатов на замену традиционных видов памяти, так как она потенциально позволит добиться большей плотности элементов при столь же высоких прочих характеристиках, таких как скорость чтения и записи, энергопотребление и время хранения информации. Такая память может быть реализована на основе мемристорных структур металл — диэлектрик — металл, в которых возможно резистивное переключение (РП), которое обычно происходит за счет образования проводящих филаментов в слое диэлектрика.

Оксид гафния — один из наиболее перспективных материалов для ReRAM, так как он достаточно хорошо изучен и обладает отличными характеристиками РП [1]. Однако в большинстве работ, посвященных РП, исследуются структуры площадью более 1 мкм², в то время как структуры в ReRAM не должны превышать 576 нм² [2]. Для исследования возможности масштабирования структур может применяться метод атомно-силовой микроскопии с измерением проводимости (ПАСМ) [3].

В данной работе оксид гафния толщиной 6 нм формировался при помощи атомно-слоевого осаждения (ALD) на кремниевой пластине покрытой 100 нм TiN. Исследовались образцы, осажденные при различных температурах при помощи термического (W-образцы) и плазмостимулированного (P-образцы) ALD. Исследования методом ПАСМ показали, что для P-образцов число филаментов росло с увеличением температуры до 275 °С, но при повышении температуры выше 275 °С начинало снижаться. Для W-образцов наблюдалась аналогичная картина, однако температура, при которой наблюдалось наибольшее число филаментов, составила 325 °С. Рост числа филаментов при повышении температуры осаждения может быть связан с ростом числа нанокристаллических зародышей в аморфном оксиде гафния [4], на которых предположительно формируются проводящие филаменты.

Дальнейшее падение числа филаментов вероятнее всего связано с повышением стехиометрии оксида и снижением концентрации кислородных вакансий, из которых состоят филаменты.

Литература

1. Pan F. et al. Recent progress in resistive random access memories: Materials, switching mechanism, and performance // Mater. Sci. Eng. R Rep., 2014. Vol. 83. P. 1–59.
2. Lanza M. et al. Recommended Methods to Study Resistive Switching Devices // Adv. Electron. Mater., 2019. Vol. 5. № 1. P. 1800143.
3. Celano U. Electrical Atomic Force Microscopy for Nanoelectronics // Cham: Springer International Publishing, 2019.
4. Chesnokov Y. M. et al. Microstructure and electrical properties of thin HfO₂ deposited by plasma-enhanced atomic layer deposition // J. Mater. Sci., 2018. № 53. P. 7214–7223.

УДК 621.315.592.4

Низкотемпературное окисление кремния с использованием генератора озона

Горохов С. А.^{1,2}, Патюков С. И.¹, Черняев М. В.¹, Резванов А. А.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
sgorohov@niime.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе исследуется кинетика низкотемпературного радикального окисления кремния в потоке озона, сформированном в озонаторе (генераторе озона). Полученные данные подтверждают уникальные возможности процесса низкотемпературного окисления в озоне — возможность формирования тонкого оксида кремния толщиной 10–20 Å при температуре 500 °С, что примерно на 150–200 градусов ниже, чем для существующего процесса ISSG-окисления.

Ключевые слова: радикальное окисление; кинетика роста оксида кремния; окисление в озоне; генератор озона.

При использовании high-k-материалов в качестве подзатворных диэлектриков в современных КМОП СБИС с проектными нормами менее 45 нм термическое окисление по-прежнему используется для создания совершенной границы раздела с полупроводником при формировании подслоя [1]. Постоянное уменьшение размеров элементов требует сокращения термического бюджета окислительных операций при сохранении качества оксида и границы раздела с кремнием. В настоящее время основным методом создания высококачественного оксида кремния толщиной 1–10 нм является процесс ISSG- (*in situ* steam-generation) окисления в установках быстрых термических процессов (RTP — rapid thermal processing). Однако ISSG-окисление имеет определенные ограничения, связанные с использованием в процессе водорода [2].

Метод термического окисления с использованием озона является свободным от этих ограничений. Этот процесс реализуется при низкой температуре вплоть до 200 °С в широком диапазоне концентрации атомарного кислорода и без водородосодержащих веществ. По сравнению с окислением в кислороде использование озона существенно увеличивает скорость роста оксида в температурном диапазоне 200–550 °С [3].

В цели данной работы входило исследование кинетики роста оксида в процессе окисления в озоне и сравнение ее с кинетикой радикального ISSG-окисления. Выбор технологических параметров процесса для достижения максимального количества радикалов кислорода определялся по результату предварительного моделирования состава газовой среды в реакторе субатмосферного давления с применением модели реактора идеального смешения [4]. В качестве механизма реакций использовался механизм диссоциации озона, описанный в работе [5].

Полученные данные подтверждают уникальные возможности процесса низкотемпературного окисления в озоне — возможность формирования тонкого оксида

кремния толщиной 10–20 Å при температуре 500°C, что примерно на 150–200 градусов ниже, чем для существующего процесса ISSG-окисления.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — С. 177.
2. Черняев М. В. и др. Кинетика радикального окисления кремния // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 3 (187). — С. 31–44.
3. Cui Z., Madsen J. M., Takoudis C. G. Rapid thermal oxidation of silicon in ozone // Journal of Applied Physics, 2000. Vol. 87. № 11. P. 8181–8186.
4. Черняев М. В. и др. Моделирование процесса ISSG окисления с применением модели реактора идеального смешения // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 1 (185). — С. 87–93.
5. Jian J. et al. A reaction mechanism for ozone dissociation and reaction with hydrogen at elevated temperature // Fuel, 2022. Vol. 322. P. 124138.

УДК 621.315.592

Оптические методы контроля и характеристики при производстве гетероструктур для полевых транзисторов на основе GaN

Артеев Д. С.^{1,2}, Сахаров А. В.^{1,2}, к. ф.-м. н., Николаев А. Е.¹,
Заварин Е. Е.^{1,2}, к. ф.-м. н., Родин С. Н.¹, Лундин В. В.¹, к. ф.-м. н.,
Цацульников А. Ф.^{1,2}, д. ф.-м. н.

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
ArteevDS@mail.ioffe.ru

² Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных
гетероструктур Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Применение оптических методов, таких как *in situ* многолучевая лазерная рефлекто-/дефлектометрия, а также *ex situ* фотолюминесцентная спектроскопия и спектроскопия оптического отражения, позволило относительно просто, быстро и недорого проводить неразрушающий контроль и характеристику гетероструктур для полевых транзисторов на основе GaN и оптимизировать параметры ростового процесса для стабильного достижения отличной однородности по пластине и высокого качества производимых структур.

Ключевые слова: нитрид галлия; транзистор; фотолюминесценция; оптическое отражение.

Полевые транзисторы на основе гетероструктур AlGaIn/GaN и AlInN/GaN с двумерным электронным газом (ДЭГ) находят все большее применение в современной мощной и высокочастотной электронике, постепенно вытесняя кремниевые транзисторы. Этому способствует уникальная совокупность свойств GaN, а именно большая ширина запрещенной зоны ~3,4 эВ, относительно высокая подвижность электронов и их насыщенная дрейфовая скорость, большая пробивная напряженность электрического поля, хорошая химическая и радиационная стойкость. Основным промышленным методом получения гетероструктур на основе III-N является газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, при котором в результате пиролиза подаваемых в реактор газов-прекурсоров на поверхности подложки происходит осаждение слоев необходимых материалов. Из-за отсутствия дешевых «родных» подложек рост структур в подавляющем большинстве случаев производят гетероэпитаксиально на подложках сапфира, кремния или карбида кремния, что сопряжено с рядом трудностей и приводит к усложнению дизайна структур, количество слоев в которых в итоге может исчисляться десятками.

Такой сложный процесс производства не может обходиться без тщательного контроля получаемых структур как непосредственно во время роста, так и после него. Особое место при этом занимают именно оптические методы благодаря своему неразрушающему характеру, относительной простоте, быстрой и дешевой проведению измерений. Так, эксплуатируемые нами в лаборатории физики полупроводниковых гетероструктур ФТИ им. А. Ф. Иоффе и НТЦ микроэлектроники РАН эпитаксиальные установки оснащены системой *in situ* многолучевой лазерной



рефлекто-/дефлектометрии на длинах волн 405 и 637 нм российской разработки, позволяющей с высокой точностью контролировать скорости роста и толщины слоев, изгиб пластины и возникающие в слоях механические напряжения. Кроме того, благодаря широкому расположению оптических преобразователей друг относительно друга с неплохой точностью возможны реконструкция трехмерного профиля (формы) подложки и оценка величин прогиба и коробления без дополнительных *ex situ* измерений.

На свойства ДЭГ, а именно на его концентрацию и подвижность, наибольшее влияние оказывает состав барьерного слоя. Для контроля состава, а также его однородности по поверхности пластины нами применяется УФ фотOLUMИНЕСЦЕНТНАЯ (ФЛ) спектроскопия с длиной волны возбуждения 266 нм в случае относительно толстых ~20–30 нм слоев AlGaInN малого состава. Канальный слой GaN может находиться в сжатом, растянутом или ненапряженном состоянии в зависимости от типа подложки и дизайна структуры, это возможно определить по положению пика GaN в спектре ФЛ. В случае когда люминесценция из барьерного слоя практически отсутствует (например барьерный слой слишком тонкий или поверх него выращен другой слой) или ширина его запрещенной зоны превышает энергию возбуждения лазера (слои AlInN или AlGaIn с повышенным содержанием Al), состав барьерного слоя определяется по спектру оптического отражения в УФ-области, а по частоте осциллирующей спектра в области прозрачности можно определить общую толщину структуры. Кроме того, с помощью теоретических расчетов спектров и сопоставления их с измеренными возможно оценить не только состав, но и толщину барьерного слоя.

Используя *in situ* и *ex situ* оптические методы для оптимизации параметров и условий ростового процесса нам удалось добиться отличных параметров однородности изготавливаемых структур, таких как относительный размах вариации $(Q_{max} - Q_{min})/Q_{mean}$ общей толщины структуры порядка 1–2%, состав барьерного слоя и удельное слоевое сопротивление ~2–4%.

УДК 621.793.162

Процесс атомно-слоевого осаждения оксида гафния и оксида циркония: эксперимент и модельное представлениеЗюзин С. С.^{1,2}, Резванов А. А.^{1,2}, Ганыкина Е. А.^{1,2}, Резник А. А.^{1,2}, Гвоздев В. А.¹¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

szyuzin@niime.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассмотрена модель процесса плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения слоев оксидов гафния и циркония, основанная на методе Монте-Карло и подробно учитывающая кинетику осаждения. Проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными на собственной установке атомно-слоевого осаждения.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение; ALD; плазма; оксид гафния; оксид циркония; HZO; моделирование; Монте-Карло; конформность.

Непрерывное масштабирование структур микроэлектроники [1] накладывает существенные ограничения на формируемые слои (например определенная стехиометрия, сверхвысокая равномерность толщины слоя и т.п.), которые затрудняют дальнейший переход к нанометровым и субнанометровым масштабам [2, 3]. Особенно важен правильный выбор технологии формирования слоев, в частности при наличии сильных ограничений для параметров процесса (например температуры для соблюдения термобюджета).

Наиболее гибким и подходящим методом получения тонких равномерных слоев считается атомно-слоевое осаждение (ALD) [4]. Суть данного метода заключается в циклически реализованной последовательности реакций прекурсоров с подложкой. Благодаря тому что химические реакции происходят на самой поверхности подложки, а также механизму самоограничения достигается высокая степень равномерности пленки по толщине, низкая шероховатость и стехиометричность состава получаемого слоя. Также используется плазмостимулированное атомно-слоевое осаждение (PEALD). Использование плазмы на шаге подачи газообразного прекурсора позволяет значительно уменьшить температуру процесса и увеличить скорость роста пленки с позитивным или отсутствующим влиянием на другие свойства слоя [5, 6].

Благодаря возможности гибкой настройки параметров процесса и используемых прекурсоров метод ALD позволяет получать комбинированные соединения управляемого состава, что влияет на свойства получаемых слоев. Так, легирование цирконием оксида гафния (фактически получение смешанного оксида $\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$ или HZO) позволяет подавить преобладающую моноклинную фазу оксида гафния и увеличить стабильность орторомбической фазы [7], что позитивно влияет на сегнетоэлектрические свойства слоя и вызывает интерес для изучения электрических характеристик слоя HZO.

В данной работе будут рассмотрены физические и электрические свойства полученных слоев HZO, а также приведены результаты компьютерного



моделирования процесса плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения данного оксида. Показано влияние температур процесса и отжига на параметры пленки. Осаждение исследованных слоев проводилось с использованием отечественной установки атомно-слоевого осаждения Изофаз «ТМ 200-01» [8].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-91-06002, <https://rscf.ru/project/23-91-06002>.

Литература

1. Iwai H. Roadmap for 22 nm and beyond // *Microelectronic Engineering*, 2009. Vol. 86. № 7–9. P. 1520–1528.
2. Белоус А. И., Красников Г. Я., Солодуха В. А. Основы проектирования субмикронных микросхем. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 782 с. ISBN 978-5-94836-603-6.
3. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // *Наноиндустрия*, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.
4. Зюзин С. С. и др. Атомно-слоевое осаждение пленок металлов и их оксидов // *Наноиндустрия*, 2020. — Т. 13. — № S5-3 (102). — С. 808–811.
5. Profijt H. V. et al. Plasma-assisted atomic layer deposition: basics, opportunitie. and challenges // *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2011. Vol. 29. № 5.
6. Nigro R. L. et al. Comparison between thermal and plasma enhanced atomic layer deposition processes for the growth of HfO_2 dielectric layers // *Journal of Crystal Growth*, 2020. Vol. 539. P. 125624.
7. Резник А. А. и др. Элемент хранения сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти: структура и свойства. — М., 2023.
8. Одинокое В. В. и др. Установка Изофаз ТМ 200-01 для термического и плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения Al_2O_3 // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*, 2019. — Т. 1. — № 1. — С. 10–14.

УДК 544.032.4

Исследование оптических и размерных свойств пленок платины, полученных методом сухой аэрозольной печати**Новосёлов А. К., Санатулина А. Ф., Вершинина О. В., Каменева Е. И., Токунов Ю. М., Мало Д., Лизунова А. А.***Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

Работа посвящена изучению оптических и морфологических свойств плазмонных структур Pt, сформированных с помощью метода сухой аэрозольной печати. Были изучены свойства пленок из первичных наночастиц, а также из модифицированных частиц.

Ключевые слова: наночастицы; платина; искровой разряд; плазмонные структуры; спектры поглощения.

Наночастицы (НЧ) платины являются перспективным материалом, так как они имеют плазмонные свойства в ультрафиолетовой (УФ) области, зависящие от размеров частиц. Используя метод газового разряда [1], можно получить наночастицы высокой чистоты. Также использование термической модификации позволяет добиться большего размера отдельных НЧ [2]. Поэтому целью данной работы является изучение свойств платиновых пленок, полученных методом сухой аэрозольной печати на стеклянной подложке [3] при различных параметрах нанесения плазмонных структур.

Сохраняя постоянными параметры печати, нанесли пленки при несущем потоке аэрозоля 100 и 400 мл/мин из первичных НЧ и термически модифицированных в трубчатой печи при температуре 985°C. С помощью спектрофотометра было получено, что для пленки с модифицированными НЧ пик поглощения находится на длины волны 265 нм, а для пленки с агломератами из первичных НЧ пик находится на длине волны ниже 240 нм (рис. 1). С помощью просвечивающей электронной микроскопии были получены изображения НЧ, представляющих собой агломераты первичных частиц и укрупненные частицы с размерами вблизи 91 нм после термической модификации (рис. 2а, д). На растровом электронном микроскопе были получены изображения поверхности напечатанных пленок (рис. 1б, е), показывающие, что без модификации поверхность пленки состоит из агломератов, в то время как при модификации укрупненные наночастицы равномерно распределены по подложке. По изображениям, полученным на оптическом профилемере (рис. 1в, ж), и профилю пленок (рис. 1г, з) были получены толщины и шероховатости пленок. Для потока 100 мл/мин толщина пленки увеличивается с $8,5 \pm 2,4$ до $33,8 \pm 9,1$ нм после термической модификации, в то же время для потока 400 мл/мин толщина растёт от $4,5 \pm 1,8$ нм до $112,4 \pm 30,0$ нм после модификации. Шероховатость пленок увеличивается с $2,6 \pm 1,0$ до $3,2 \pm 0,5$ и от $2,4 \pm 1,4$ до $11,6 \pm 5,1$ нм для потоков 100 и 400 мл/мин соответственно после термической модификации НЧ в печи.

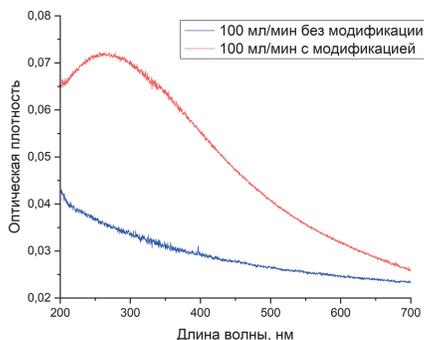


Рис. 1. Спектры поглощения пленок из первичных и модифицированных наночастиц

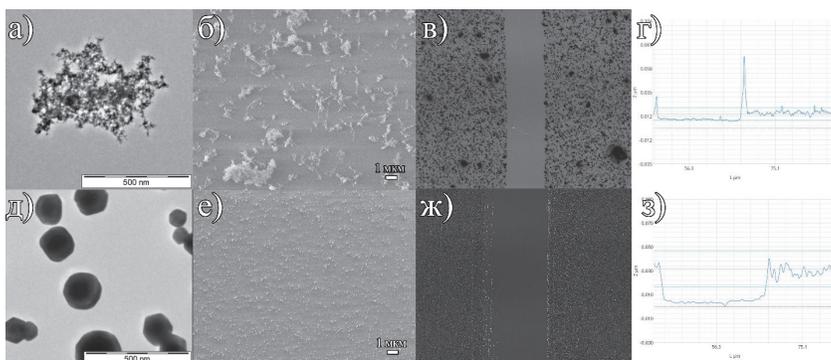


Рис. 2. Пленки, полученные при несущем потоке 100 мл/мин: ПЭМ-изображение первичных НЧ платины без модификации (а); РЭМ-изображения агломератов НЧ без модификации (б); изображение пленки с оптического профилометра для НЧ без модификации (в); профиль пленки из НЧ без модификации (г); ПЭМ-изображение первичных НЧ платины с модификацией (д); РЭМ-изображения агломератов НЧ с модификацией (е); изображение пленки с оптического профилометра для НЧ с модификацией (ж); профиль пленки из НЧ с модификацией (з)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00311.

Литература

1. Efimov A. A., Arsenov P. V., Borisov V. I. et al. Synthesis of nanoparticles by spark discharge as a facile and versatile technique of preparing highly conductive Pt nano-ink for printed electronics // *Nanomaterials*, 2021, 11 (1). 234.
2. Lizunova A., Mazharenko A., Masnaviev B. et al. Effects of Temperature on the Morphology and Optical Properties of Spark Discharge Germanium Nanoparticles // *Materials*, 2020. 13 (19), 4431.
3. Efimov A., Arsenov P., Kornushin D. et al. Aerosol Jet Printing of Silver Lines with A High Aspect Ratio on A Heated Silicon Substrate // *Materials*, 2020. 13 (3), 730.

УДК 544.558

Исследование адгезионных свойств оснований печатных плат после плазмохимического травления при различных температурах хранения**Аверина А. И.¹, Каширин Н. В.¹, Сидоров Р. В.²**¹ *Марийский государственный университет**424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1**irene75@inbox.ru, kachnic@mail.ru*² *ООО «ТЕХНОТЕХ»**424007, г. Йошкар-Ола, ул. Строителей, 98**ruslan.sidorov.teh@gmail.com*

В работе исследовались адгезионные свойства оснований печатных плат после их плазмохимического травления при различных температурах хранения и их изменения с течением времени. Показано, что критические времена хранения оснований печатной платы зависят от температуры и уменьшаются с ее повышением.

Ключевые слова: печатная плата; плазмохимическое травление; показатель адгезии; время хранения.

Одной из технологических операций при изготовлении печатной платы (ПП) является нанесение жидкой паяльной маски [1]. Перед ее нанесением производится подготовка поверхности ПП. Одним из видов подготовки является плазмохимическое травление (ПХТ). Результатом этой операции является увеличение поверхностной шероховатости и придание поверхности ПП особых свойств, обеспечивающих хорошее сцепление с последующим наносимым слоем полимерной защитной паяльной маской. Однако свойства поверхности ПП, активированной методом ПХТ, с течением времени изменяются [2], а именно ухудшается адгезия к паяльной маске.

Целью наших исследований являлось выяснение влияния температуры хранения основания ПП (стеклотекстолита марки FR-4) на их адгезионные свойства и определение изменения этих свойств с течением времени.

Активацию поверхности образцов производили в установке плазмохимического травления Plasma Desmear System JSPDS-500 VW. Измерение показателя адгезии осуществлялось в соответствии с ГОСТ 32299-2013 методом отрыва липкой ленты [3]. Использовался адгезиметр собственной конструкции, обеспечивающий отрыв полиимидной ленты от поверхности под углом 90 градусов с постоянной скоростью [4]. В качестве показателя адгезии принималось усредненное усилие отрыва F_a [4].

В ходе эксперимента получены зависимости показателя адгезии от времени хранения для образцов, активированных методом ПХТ, в сравнении с образцами, поверхность которых не подвергалась активации, при этом они хранились в одинаковых условиях. Для образцов, поверхность которых не активирована, показатель адгезии практически не менялся с течением времени. Полученные зависимости для образцов, поверхность которых активирована, имели вид сложных спадающих кривых, на которых явно прослеживаются два участка: 1 — начальный быстро



спадающий участок; 2 — конечный медленно спадающий участок. Эти участки мы аппроксимировали линейными функциями. Пересечение аппроксимирующих прямых дает условное время перехода t_a от одного участка к другому и, по нашему мнению, отражает критическое время хранения ПП перед последующей операцией — нанесением защитной паяльной маски. Оказалось, что t_a уменьшается с увеличением температуры хранения образцов.

Анализ полученных экспериментальных данных позволил нам высказать предположение, что изменение с течением времени адгезионных свойств поверхности ПП после активации методом ПХТ может быть обусловлено воздействием различных факторов и явлений на активированной поверхности с развитой морфологией, например процессов адсорбции молекул воды из окружающей среды.

Практическая значимость исследований заключается в разработке метода и методики проверки и анализа качества активации поверхности ПП методом ПХТ, способа контроля адгезионных свойств и определения критического времени хранения ПП после активации ее поверхности методом ПХТ. Полученные нами критические времена хранения для различных оснований ПП, полученные с использованием предложенной методики, приняты предприятием ООО «ТЕХНО-ТЕХ», г. Йошкар-Ола, — лидирующим производителем ПП в России (извещение ДСГ 1162/24 от 19.03.2024 г.). В результате на предприятии снизился процент отбраковки, улучшилось качество продукции, снизились затраты на производство.

Литература

1. Петров Н. Защитная паяльная маска: с самого начала // Технологии в электронной промышленности, 2015. — № 4. — С. 44–46.
2. Акишев Ю. С., Гильман А. Б., Грушин М. Е., Драчев А. И., Каральник В. Б., Петряков А. В., Трушкин Н. И. Изменение во времени поверхностных свойств полимеров, модифицированных в плазме // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология, 2012. — Т. 55. — № 4. — С. 42–51.
3. ГОСТ 32299-2013. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва. Введ. 01.08.2014. — М.: Стандартинформ.
4. Аверина А. И., Гурьянов А. Е. Исследование адгезионных свойств поверхности печатной платы // Студенческая наука и XXI век, 2023. — Т. 20. — № 1 (23). — Ч. 1. — С. 4–8.

УДК 533.924

Стратегия и тактика в разработке стабильного процесса плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления

Шибанов Д. Р., к. ф.-м. н. Лопаев Д. В., д. ф.-м. н. Рахимов А. Т., к. ф.-м. н. Рахимова Т. В.

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики им Д. В. Скобельцына
119234, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2*

Исследованы механизмы плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления (PEALE) в низкотемпературной высокочастотной плазме низкого давления в экспериментальном промышленном реакторе «Плазма ТМ 200-04» АО «НИИТМ». Оптимизация процессов бездефектного PEALE SiO₂ и Si₃N₄.

Ключевые слова: атомно-слоевое травление; низкотемпературная ВЧ-плазма; плазменное травление; диагностика плазмы; взаимодействие плазмы с поверхностью.

Атомно-слоевое травление [1–3] — это метод послойного удаления материала с помощью циклической цепочки самоограничивающихся реакций. Любой процесс атомно-слоевого травления состоит из как минимум двух этапов: модификации поверхностного слоя и удаления модифицированного слоя. Важно отметить, что каждая из реакций должна быть самоограничивающейся, т. е. процесс модификации должен затрагивать только верхний (в пределе моноатомный) слой материала, не вызывая травления, а процесс удаления — травить только модифицированный слой, не повреждая первоначальный материал.

В плазменно-стимулированном атомно-слоевом травлении (Plasma Enhanced Atomic Layer Etching — PEALE) используется низкотемпературная высокочастотная (ВЧ) плазма низкого давления для модификации поверхности, стимулирования поверхностных реакций травления и последующего удаления продуктов реакций. Применение низкотемпературной ВЧ-плазмы в процессах ALE является перспективным направлением в развитии ALE, предлагая большую скорость и контроль процессов в сравнении с другими методами.

Разработка механизмов и сценариев плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления имеет большое значение в современных промышленных технологиях микроэлектроники. Достижение атомарной точности обработки поверхности при создании СБИС важно:

1) для кремниевой технологии с топологическим размером ≤ 7 –14 нм, накладывающей жесткие ограничения на процент возможных дефектов в конечных структурах;

2) для микросхем для сверхвысокочастотной (СВЧ) и квантовой электроники, требующих прецизионной точности формирования межслойных контактов, при топологических размерах от сотен нанометров до десятков микрон.

В концепции каждый этап в PEALE [4–7] должен быть самоограничивающимся, что на практике труднодостижимо, особенно при наложении требований на производительность процессов [3, 5, 8]. Низкая повторяемость циклов вплоть до вырождения в непрерывное травление из-за взаимодействия плазмы со стенками реактора, а также создание дефектов и загрязнение нижележащих слоев



являются главными проблемами процессов PEALE. Преодоление этих сложностей и оптимизация каждого шага цикла невозможны без понимания физических процессов, протекающих на поверхности материала, в объеме плазмы и на стенках реактора.

В этой работе представлено исследование факторов, влияющих на повторяемость и бездефектность процессов плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления. На примере разных процессов PEALE SiO₂ продемонстрированы причины образования дефектов и методы их минимизации. В процессах плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления Si₃N₄ продемонстрированы причины низкой повторяемости и вырождения процессов. *In situ* контроль параметров плазмы (с помощью зондовых диагностик) и толщины материала (лазерной эллипсометрией), а также *ex situ* РФЭС-анализ образцов на каждом этапе процесса позволили сформулировать стратегию разработки процессов бездефектного плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления. Результаты продемонстрированы на примере оптимизации рецептов PEALE SiO₂ и Si₃N₄ в экспериментальном промышленном реакторе «Плазма ТМ 200-04» АО «НИИТМ». Процессы бездефектного плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления демонстрируют высокую повторяемость на протяжении сотен циклов.

Литература

1. Kanarik K. J. et al. Overview of atomic layer etching in the semiconductor industry // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surface, and Films, 2015. Vol. 33. № 2. P. 020802.
2. Kanarik K. J. et al. Universal scaling relationship for atomic layer etching // Journal of Vacuum Science & Technology A. American Vacuum Society, 2021. Vol. 39. № 1. P. 010401.
3. Kanarik K. J. et al. Predicting synergy in atomic layer etching // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surface, and Films, 2017. Vol. 35. № 5. P. 05C302.
4. Oehrlein G. S., Metzler D., Li C. Atomic Layer Etching at the Tipping Point // An Overview, 2015. Vol. 4. № 6.
5. Metzler D. et al. Fluorocarbon assisted atomic layer etching of SiO₂ using cyclic Ar/C₄F₈ plasma // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surface, and Films, 2014. Vol. 32. № 2.
6. Metzler D. et al. Characterizing fluorocarbon assisted atomic layer etching of Si using cyclic Ar/C₄F₈ and Ar/CHF₃ plasma // J. Chem. Phys., 2017. Vol. 146. № 5.
7. Mannequin C. et al. Comparative study of two atomic layer etching processes for GaN // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surface, and Films, 2020. Vol. 38. № 3.
8. Hsiao S.-N., Sekine M., Hori M. In Situ Monitoring of Etching Characteristic and Surface Reactions in Atomic Layer Etching of SiN Using Cyclic CF₄/H₂ and H₂ Plasmas // ACS Appl Mater Interfaces, 2023. Vol. 15. № 29. P. 35622–35630.

УДК 621.382.2/3

Изучение влияния состава газовой смеси на профиль травления межсоединений металлических слоев в технологическом процессе КМОП 180 нм

Михайлова А. В.^{1,2}, Травкина Д. С.¹, Степанов А. А.^{1,3}, Леготин С. А.²¹ АО «Микрон»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
annastasiaro@mail.ru² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе проведено исследование влияния состава плазмы в смеси $C_4F_8 + Ag + O_2 + CO$ в условиях, характерных для процессов реактивно-ионного травления, на профиль травления межсоединений металлических слоев. Проведены технологические эксперименты с варьированием концентрации газов. Изучены теоретические основы процесса травления диэлектрических слоев в плазме фторсодержащих газов для подтверждения полученных результатов.

Ключевые слова: полупроводниковое производство; металлические межсоединения; переходные окна; via; плазмохимическое травление; технология КМОП 180 нм.

В настоящее время современное полупроводниковое производство должно быть гибким и адаптивным, так как развитие технологических процессов не стоит на месте. Могут произойти непредвиденные события, влияющие на производство, например, замена материалов. Такая ситуация может сказаться на физике и химии выполняемой технологической операции. Такого рода изменения всегда требуют хорошей осведомленности о теоретических физических и химических принципах работы для того, чтобы иметь возможность изменения процесса в соответствии с новыми условиями без ухудшения качества выпускаемой продукции.

Основную роль в процессах создания интегральных микросхем играют процессы плазмохимического травления [1]. Так как в большинстве случаев основным материалом интегральных микросхем является кремний и его соединения (SiO_2 , Si_3N_4 и SiC), для травления таких материалов используются фторуглеродные газы с общей формулой $C_xH_yF_z$. Среди них CF_4 характеризуется наиболее высоким соотношением F/C и обеспечивает преобладание процесса травления над процессом поверхностной полимеризации в типичных условиях реактивного ионного травления. Более полимеризующиеся фторуглероды (C_4F_8 , C_4F_6 , CHF_3 и CH_2F_2) обычно используются для процессов травления, которые требуют высокой анизотропии травления SiO_2 . Примером является травление переходных отверстий через слой SiO_2 , где необходимо получить субмикронные размеры вместе с высоким соотношением сторон [2].

В ходе работы было проведено исследование влияния состава газовой смеси $C_4F_8 + Ag + O_2 + CO$ в процессе плазмохимического травления оксида кремния

на профиль и минимальные линейные размеры формируемых межсоединений металлических слоев (via).

В результате работы получены зависимости профиля травления переходных окон от состава газовой смеси. Выявлены зависимости влияния плотности заполнения слоя на скорость травления, профиль межсоединений и минимальный размер формируемых элементов. Результатом этой работы стало адаптивное изменение процесса травления диэлектрических слоев под текущее состояние производственного процесса.

Литература

1. Plummer J. D. Silicon VLSI Technology: Fundamentals // Practice and Modeling, 2000. P. 609–679.
2. Технология СБИС / Под ред. Зи С. М. — М.: Мир, 1986. — Т. 2 — С. 5–59.

УДК 533.924

Исследование механизма атомно-слоевого травления диэлектриков в установке плазмохимического травления

Кузьменко В. О., Мельников А. Е., к. ф.-м. н., Мьяконьких А. В.

ФТИАН им. К.А. Валиева РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

kuzmenko@ftian.ru

Исследован механизм процесса атомно-слоевого травления диэлектриков в технологической установке плазмохимического травления с источником индуктивно-связанной плазмы. Изучена возможность оптимизации процесса травления путем выбора параметров плазмы.

Ключевые слова: атомно-слоевое травление; диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью; индуктивно-связанная плазма; фторуглеродные пленки.

Уменьшение топологических размеров микроэлектронных устройств приводит к возрастающим требованиям к точности переноса профиля маски при создании структур [1]. Атомно-слоевое осаждение (ALD) и атомно-слоевое травление (ALE) HfO_2 важны для производства полевых транзисторов, изготовленных по проектным нормам < 45 нм. Другим возможным применением атомно-масштабных процессов материалов на основе оксида Hf является производство мемристорных структур [2].

Идея процесса ALE схожа с концепцией ALD и заключается в последовательном проведении насыщающихся реакций на поверхности травящегося функционального слоя. Процесс состоит из двух циклически повторяющихся шагов. На первом шаге, называемом модификацией поверхности, на поверхности травящегося материала создается модифицированный слой, который самостоятельно не травит функциональный слой. На втором шаге происходит активация реакции между модифицированным слоем и функциональным слоем и удаление продуктов реакции с поверхности за счет бомбардировки ускоренными ионами из плазмы.

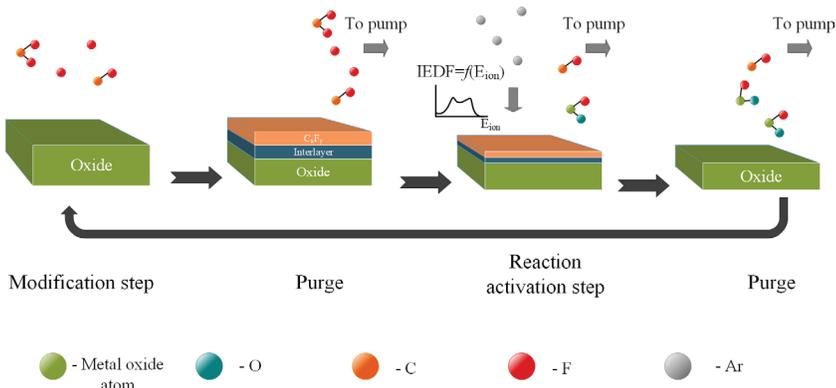


Рис. 1. Схема процесса атомно-слоевого травления



В настоящей работе исследован процесс атомно-слоевого травления HfO_2 , в котором модификация поверхности осуществлялась в плазме $\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{H}_2$. Активация реакции происходила в плазме Ar путем приложения напряжения смещения к образцу. Исследован механизм травления HfO_2 , который заключается во фторировании поверхности HfO_2 и осаждении фторуглеродной пленки на поверхности на шаге модификации. На шаге активации реакции происходило удаление фторуглеродной пленки и модифицированного слоя. Показаны возможность управления процессом травления за счет выбора параметров разряда Ar на шаге активации реакции, а также преимущество процесса атомно-слоевого травления перед процессом распыления.

Работа проведена в молодежной лаборатории функциональных диэлектриков в рамках государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН Минобрнауки Российской Федерации по теме № FFNN-2022-0020.

Литература

1. Adamovich I., Agarwal S., Ahedo E., Alves L. L., Baalrud S. et al. The 2022 Plasma Roadmap: low temperature plasma science and technology // J. Phys. D: Appl. Phys., 2022. Vol. 55. P. 373001-1–373001-55.
2. Permiakova O. O., Rogozhin A. E., Miakonkikh A. V., Smirnova E. A., Rudenko K. V. Transition between resistive switching modes in asymmetric HfO_2 -based structures // Microelectronic Engineering, 2023. Vol. 275. P. 111983.

УДК 621.382

Исследование процесса селективного плазмохимического травления слоя р-GaN в гетероструктуре GaN/AlGaN

Тахири П. Ю., к. т. н. Зайцев А. А., к. т. н. Егоркин В. И.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

pauline.takhiri@gmail.com

Разработан высокоселективный процесс плазмохимического травления слоя р-GaN в гетероструктуре р-GaN/Al_{0,2}Ga_{0,8}N/AlN/GaN для формирования затворов нормально закрытых силовых транзисторов. Получена зависимость селективности от параметров процесса. Приведены ВАХ транзисторов, затворы которых были получены путем травления в индуктивно-связанной плазме.

Ключевые слова: р-GaN; индуктивно-связанная плазма; селективное травление; силовой нормально закрытый транзистор.

Гетероструктуры на основе GaN имеют ряд уникальных свойств, позволяющих выгодно использовать их для создания силовых транзисторов [1]. Нитрид галлия обладает широкой запрещенной зоной, что обеспечивает высокое значение критического электрического поля по сравнению с кремнием. Хорошая теплопроводность GaN делает его пригодным для работы при больших значениях мощности и температуры, а благодаря высокой дрейфовой скорости насыщения электронов устройства на его основе способны работать на большей частоте. В особенности интерес представляют гетероструктуры на основе этого полупроводника с высокими значениями подвижности и концентрацией носителей заряда в двумерном электронном газе (2DEG), которые приводят к большому току насыщения структуры [2].

Процесс плазмохимического травления является основополагающим при формировании силовых нормально закрытых транзисторов на основе GaN. Точный контроль глубины травления р-GaN за пределами затворной области с минимальными повреждениями нижележащего слоя AlGaN необходим, чтобы концентрация носителей заряда в 2DEG не уменьшалась, а канал под затвором при нулевом напряжении оставался закрытым. Нежелательное утонение слоя AlGaN даже на несколько нанометров может привести к резкому снижению плотности носителей и, следовательно, увеличению сопротивления канала, что приведет к снижению выходных характеристик транзистора. Утонение легированного GaN способствует утечке носителей в закрытом состоянии [3].

В работе исследовалось влияние газовой смеси, давления и мощности на селективность травления р-GaN. В качестве образцов применялись кремниевые пластины с гетероструктурой р-GaN/Al_{0,2}Ga_{0,8}N/AlN/GaN. Эксперимент проводился на установке плазмохимического травления CORIAL 200L. Проведено исследование морфологии поверхности после травления р-GaN методом атомно-силовой микроскопии. Исследование профиля области затвора методом просвечивающей электронной микроскопии подтверждает, что травление останавливается на слое AlGaN. Разработан высокоселективный процесс травления в индуктивно-связанной плазме. Приводятся вольт-амперные характеристики силового нормально

закрытого транзистора, затвор которого был сформирован путем травления в индуктивно-связанной плазме.

Литература

1. Гольцова М. Мощные GaN-транзисторы Истинно революционная технология // Электроника: наука, технология, бизнес, 2012. — № 4. — С. 86–101.
2. Egorkin V.I. et al. Normally-Off p-Gate Transistor Based on AlGaIn/GaN Heterostructures // Semiconductors, 2021. Vol. 55. № 13. P. 1039–1044.
3. Zhang P. et al. High selectivity, low damage ICP etching of p-GaN over AlGaIn for normally-off p-GaN HEMTs application // Micromachines, 2022. Vol. 13. № 4. P. 589.



УДК 621.3.082

Влияние контактных явлений при проведении зондовых параметрических измерений низкоразмерных областей

Спирidonov С. В.

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева — КАИ
420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10
com-m-a-i-l@yandex.ru*

В работе рассмотрены особенности проведения зондовых измерений с низкоразмерных контактных областей. Проведена экспериментальная оценка явлений, возникающих в момент касания и отрыва измерительного зонда. Показано, что для низкоразмерного контакта характерна специфическая зависимость величины тока от площади контакта и степени его удаления от площадки. Выявленную зависимость предложено использовать для анализа качества прилегания зонда и исключения вносимых контактом ошибок измерений.

Ключевые слова: зондовое измерение; параметрический контроль; низкоразмерные контакты; контактные явления.

Параметрические измерения являются одним из востребованных в микроэлектронике методов производственного контроля. Как правило, они проводятся на основе зондовых измерений [1] со специальных контактных площадок в зоне спейсера, разделяющих полупроводниковые кристаллы. На текущий момент размеры контактных площадок соизмеримы с микронными, что обеспечивает надежный контакт и высокую воспроизводимость измерений. При этом повышение степени интеграции приводит к необходимости увеличения числа площадок и сокращению их размера [2].

В представленной работе рассмотрены особенности проведения зондовых измерений с низкоразмерных контактных областей (с линейными размерами менее 100 нм). Малые размеры накладывают ограничения на размеры самих зондов, радиус скругления которых начинает стремиться к единицам нанометров. При таких измерениях начинают себя проявлять специфические контактные явления, свойственные квантовым типам проводимости [3]. Это может стать причиной искажения результатов измерений и появления погрешностей.

В ходе экспериментальной апробации проведена оценка проводимости интерфейса «зонд — контактная площадка» при различных степенях контакта. Рассмотрены случаи от полного контакта до полного разрыва (диапазон расстояний 0–100 Å). Показано, что в процессе разрыва величина тока изменяется по определенной зависимости, характерной для двух специфических областей. Первая область — утонение контакта вследствие межатомной перестройки металла [4, 5], вторая — область туннелирования. По величинам токов возможно провести разделение областей и оценку качества контакта. Помимо этого, при проведении низковольтных измерений (величин порядка 100 нА) подобные контактные явления способны вносить значимую погрешность. В таких случаях выявленная закономерность может быть использована для программной корректировки результатов измерений.



Литература

1. Водсворф А. Справочник по параметрическим измерениям. Третье издание // Agilent Technologies, 2012. — 218 с.
2. IEEE International Roadmap for Devices and Systems. Executive Summary 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. DOI: 10.60627/C13Z-V363.
3. Спиридонов С. В., Русяев Н. Н., Трифонов А. А., Сафина И. Р. Исследование влияния частичного разрыва низкоразмерного нанопровода на его вольт-амперные характеристики // Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век, 2014. — Т. 6. — № 4. — С. 42–53.
4. Park H. S., Zimmerman J. A. Stable nanobridge formation in $\langle 110 \rangle$ gold nanowires under tensile deformation // Scripta Materialia, 2006. Vol. 54. P. 1127–1132.
5. Da Silva E. Z., Novaes F. D., da Silva A. J. R. and Fazzio A. Theoretical study of the formation, evolution and breaking of gold nanowires // Phys. Rev. B, 2004. Vol. 69. P. 115411–115422.



УДК 535.374

Изготовление плазмонных наноструктур платины методами печатной электроники для усиления фотолюминесценции

**Керечанина М. Ф., Храмов Е. С., Санатулина А. Ф., Новосёлов А. К., к. т. н.
Лизунова А. А., д. ф.-м. н. Иванов В. В.**

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

Изготовлены плазмонные наноструктуры методом микроплоттерной печати на кварцевых стеклах на основе наночастиц платины со средним радиусом от 3 до 45 нм. Приведены характеристики полученных пленок и показаны перспективы их применения. Проведены теоретические расчеты фактора усиления фотолюминесценции в ультрафиолетовой области для частиц, аналогичных экспериментальным.

Ключевые слова: локализованный поверхностный плазмонный резонанс; наночастицы платины; усиление фотолюминесценции; ультрафиолет (УФ); микроплоттерная печать.

Металлические наночастицы сильно рассеивают и поглощают свет определенных длин волн из-за резонансного возбуждения колебаний плотности заряда, известных как поверхностный плазмонный резонанс [1]. На сегодняшний день плазмонные свойства наноструктур на основе наночастиц (НЧ) золота и серебра, которые находятся в видимой и ближней инфракрасной области спектра, хорошо изучены и широко используются в оптоэлектронике и создании биосенсоров [2]. В то же время перспективным, но менее изученным материалом, имеющим резонансный пик поглощения в ультрафиолетовой (УФ) области, считаются НЧ платины [3].

В работе использовались НЧ платины, синтезированные в импульсном газовом разряде, с различным средним размером: 3, 27 и 45 нм (рис. 1).

Из НЧ платины изготавливалась жидкая суспензия на основе хроматографически чистого изопропилового спирта с добавлением поливинилпироллидона для стабилизации. Методом микроплоттерной печати суспензия наносилась на кварцевую подложку для получения тонкой пленки.

В качестве люминофора использовались кристаллы оксида цинка с характерной длиной волны эмиссии 377 нм. Из кристаллов изготавливалась суспензия, которая также методом микроплоттерной печати наносилась на кварцевую подложку.

Перспективы применения были оценены с помощью расчетов фактора усиления люминесценции по теории Ми. Показано, что фактор усиления для квантового выхода 0,1 на длине волны 377 нм максимален для самых крупных частиц (средний радиус НЧ 45 нм), усиление люминесценции при этом составляет до 16 раз (рис. 3).

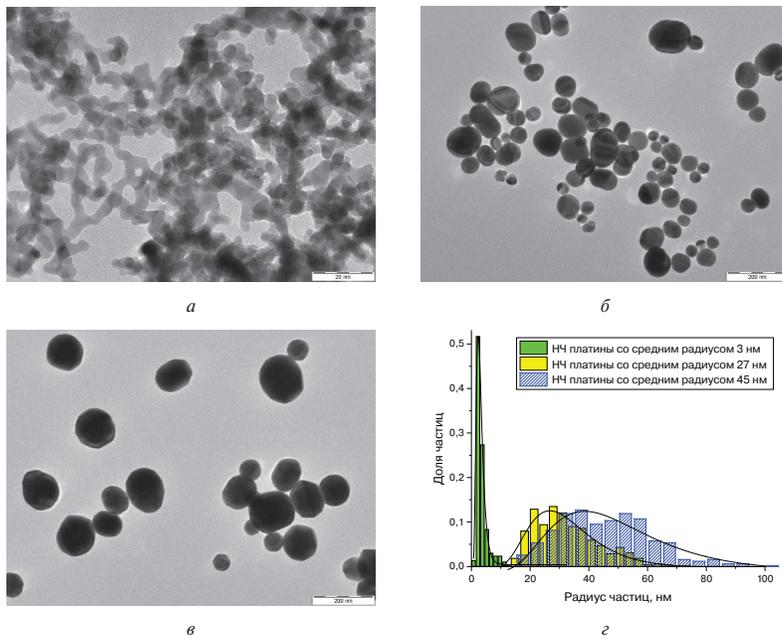


Рис. 1. Просвечивающая электронная микроскопия наночастиц, полученных в газовом разряде: а) со средним радиусом 3 нм; б) со средним радиусом 27 нм; в) со средним радиусом 45 нм; г) распределение частиц по размерам

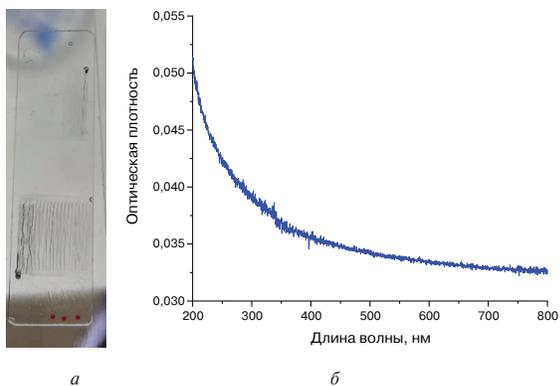


Рис. 2. Фото пленки (а); оптическая плотность пленки (б)

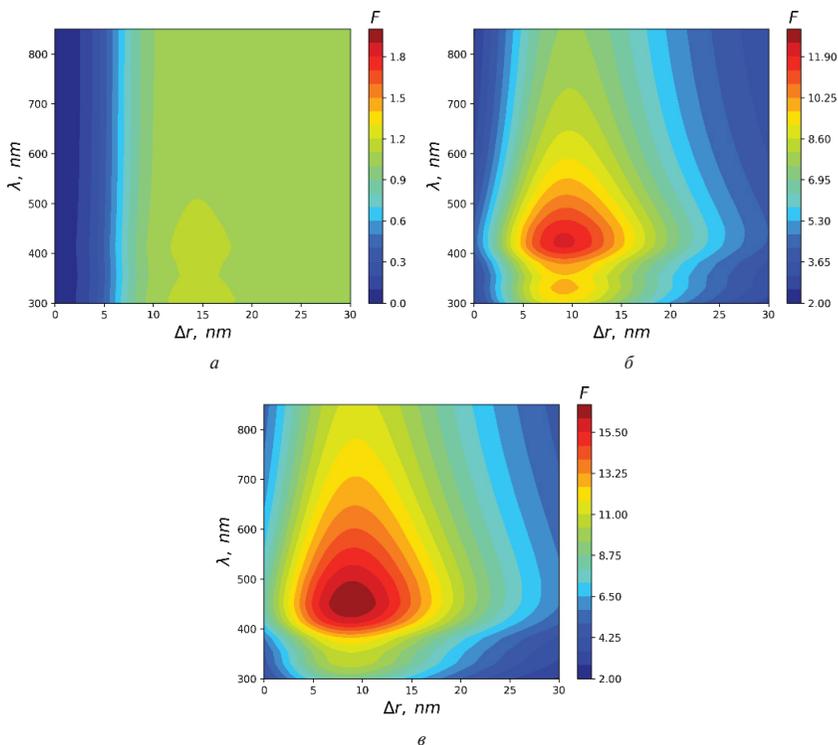


Рис. 3. Расчетные значения фактора усиления люминесценции эмиттера с длиной волны эмиссии 377 нм и квантовым выходом 0,1 в присутствии НЧ платины со средним радиусом: а) 3 нм; б) 27 нм; в) 45 нм

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание) № 075-03-2024-107, номер проекта FSMG-2022-0034.

Литература

1. Bohren C. F. and Huffman D. R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley. New York, 1983.
2. Gaponenko S. V. Introduction to Nanophotonics. Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2010.
3. Naik G. V., Shalaev V. M., Boltasseva A. Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver // Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 2013. № 25. P. 3264–3294.



УДК 621.315.61

Процессы гидрофобизации пористых органосиликатных пленок для систем многоуровневой металлизации ИС

Воротынец Д. А.

МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

vorotyntsev@mirea.ru

Исследованы методы гидрофобизации перспективных пористых органосиликатных пленок для использования в качестве материалов с низкой диэлектрической проницаемостью в системах многоуровневой металлизации интегральных схем. Рассмотрены методы, основанные на модификации исходных прекурсоров и постгидрофобизация путем обработки в парах гексаметилдисиладана.

Ключевые слова: гидрофобизация; органосиликатные пленки; метил-модификация; FTIR; порометрия.

Введение в материал субтрактивной пористости позволило уменьшить значения диэлектрической проницаемости low-k-материалов, используемых в BEOL-процессах с топологическими нормами 45 нм и менее [1]. Однако, несмотря на все преимущества использования пористых материалов, существенной проблемой является их гидрофильность, обусловленная остаточными силанолами на поверхности пор, которые могут образовываться в процессе формирования пленок и их последующей обработки, прежде всего травления в плазме. Гидрофильность и поглощение влаги приводят к деградации электрических свойств пленок. Особенно существенной данная проблема становится в новых типах low-k-диэлектриков — периодических мезопористых органосиликатах (PMO), в которых используются относительно большие молекулы прекурсоров и силанола могут возникать вследствие стерических эффектов.

В рамках работы были исследованы способы гидрофобизации двух типов перспективных PMO — пористых органосиликатных пленок с мостиковыми этиленовыми и бензольными группами. Одним из способов являлось использование в составе пленкообразующего раствора мостикового прекурсора с дополнительной концевой метильной группой 1-(триэтоксиллил)-2-(диэтоксиметилсиллил)этан (TESDEMSE). Методом ИК Фурье-спектроскопии было выявлено, что пленки на основе TESDEMSE содержат минимальное количество воды, а также в их составе присутствуют диметилы, что связано с частичным разрушением мостиковых групп при термической обработке при 430 °С [2]. Термодеструкция этиленового мостика приводит к образованию еще одной метильной группы, которая, в свою очередь, может объединиться с соседней метильной группой и образовать диметил. Исследование методом адсорбционной порометрии показало, что, помимо увеличения гидрофобности, дополнительная концевая метильная группа в составе прекурсора также воздействует на пористую структуру, а именно структура таких пленок отличается полным отсутствием микропор.

Вторым способом является поверхностная модификация парами гексаметилдисиладана (HMDS). При взаимодействии данного газа с поверхностными силанольными группами происходит реакция, в результате которой на месте силанолов



образуются три метильные группы. Для эксперимента были выбраны пленки со 100%-м содержанием бензольных мостиков как наиболее гидрофильный представитель с малыми размерами пор и большим модулем Юнга. ИК Фурье-спектроскопия продемонстрировала успешное внедрение молекул HMDS в микропористую структуру пленок: появляются пики, характерные для групп $\text{Si}(-\text{CH}_3)_{1,3}$. Исследования влияния отжига на привитые группы показали отсутствие их термостабильности [3]. Анализ адсорбционной порометрии показал укрепление стенок пор после обработки парами HMDS, так как изотермы адсорбции обработанного образца после термообработки при 350 и 430 °С практически не меняются в отличие от пленок без поверхностной модификации, у которых уменьшается открытая пористость вследствие схлопывания пор и усадки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда
(№ 23-79-30016).*

Литература

1. Ненашев Р. Н., Котова Н. М., Вишнеvский А. С., Воротилов К. А. Исследование влияния порога Vrij@ 30 на свойства тонких полиметилсилесквioxидных пленок, полученных золь-гель-методом // Неорган. материалы, 2016. — Т. 52. — № 9. — С. 1035–1039.
2. Vishnevskiy A. S., Seregin D. S., Palov A. P., Orlov G. A., Yakushev V. A., Ovchinnikov I. S., Vorotilov K. A., Baklanov M. R. Temperature evolution of organosilicate glass films with organic bridges // Microporous and Mesoporous Materials, 2024. Vol. 363. P. 112783.
3. Воротынцев Д. А., Вишнеvский А. С., Серегин Д. С., Воротилов К. А., Сигов А. С., Бакланов М. Р. Исследование тонких пористых пленок на основе прекурсора, содержащего фениленовые мостиковые группы // Вестник РФФИ, 2023. — Т. 118. — № 2. — С. 31–52.



УДК 621.3.049

Разработка отечественной UHF-микросхемы для применения в области радиочастотных меток

Эпов И. В.^{1,2}, Резник А. Ю.³¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
ierov@niime.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Работа посвящена проектированию и разработке первой отечественной микросхемы UВЧ-диапазона для применения в области радиочастотной идентификации. Измерения показали, что радиочастотная метка на основе разработанной отечественной микросхемы имеет дальность считывания 12,5 метров в диапазоне 850–950 МГц.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация; микросхема; UВЧ; чувствительность; импеданс.

Компанией АО «Микрон» была спроектирована и изготовлена первая отечественная микросхема UВЧ-диапазона для применения в области радиочастотной идентификации (RFID). RFID — это технология, суть которой заключается в бесконтактном считывании всей необходимой информации, которая хранится в прикрепляемых к различным объектам транспондерах (радиометках), по запросу устройства считывания информации [1–4].

Микросхема разрабатывалась с учетом требований имеющейся на предприятии технологии для минимального топологического размера 180 нм, действующих правил проектирования и имеющейся библиотеки электронных компонентов. При проектировании учитывались предложения и рекомендации специалистов дизайн-центров, традиционных партнеров предприятия [5].

Требовалось разработать микросхему, которая могла обеспечить приемлемую дальность считывания информации из метки (не менее 10 метров) при согласовании комплексных импедансов микросхемы и антенны в диапазоне 850–950 МГц. В этом случае чувствительность микросхемы должна была иметь значение не менее –17,5 дБм [6].

Первичная версия разработанной микросхемы имела значение чувствительности (пороговой мощности) около –13 дБм. Были произведены несколько корректировок топологии микросхемы. Например, был добавлен стабилизатор напряжения питания, уменьшающий сквозную утечку в цифровой части, и снижен ток потребления с 30 до 2 мкА для работы в условиях слабых входных мощностей. В результате новая версия микросхемы имеет чувствительность около –19 дБм.

Для практического исследования была разработана пробная антенна типа T-match, плечи которой припаивались к выводным контактам микросхемы [7]. Полученная метка была измерена в свободном пространстве с помощью программно-измерительного оборудования Voyantic Tagformance Pro. Измерения показали, что

метка на основе разработанной отечественной микросхемы имеет дальность считывания 12,5 метров в диапазоне 850–950 МГц.

Таким образом, разработанная отечественная микросхема УВЧ-диапазона может иметь применение в составе конструкции радиочастотной метки для решения различных задач идентификации: отслеживание товаров и грузов, инвентаризация объектов на складах, запись и расчет ресурса буровых труб, с помощью которых образуются нефтедобывающие скважины, и т.д.

Литература

1. Dobkin D. The RF in RFID: UHF RFID in practice // Newnes, 2012.
2. Zubov I. A., Losevskoy A. Y., Ermakov I. V., Nuykin A. V., Kravtsov A. S. An UHF RFID Tag Design in a Single-Poly 90 nm CMOS Process // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, St. Petersburg and Moscow, 27–30 января 2020 года. St. Petersburg and Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 208–211.
3. Шарфельд Т. Системы RFID низкой стоимости. —М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — Т. 7. — С. 15.
4. Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Мытник К. Я. Перспективы развития универсальной защищенной программно-аппаратной платформы со сверхнизким потреблением для устройств Интернета вещей // Наноиндустрия, 2019. — №8 (89). — С. 328–329.
5. Egorov K. V., Kirtaev R. V., Lebedinskii Y. Y., Orlov O. M. et al. Complementary and bipolar regimes of resistive switching in TiN/HfO₂/TiN stacks grown by atomic-layer deposition // Physica Status Solidi. A: Applications and Materials Science, 2015. Vol. 212. №4. P. 809–816.
6. Friis H. T. A note on a simple transmission formula // Proceedings of the IRE, 1946. Vol. 34. № 5. P. 254–256.
7. Marrocco G. The art of UHF RFID antenna design: Impedance-matching and size-reduction techniques // IEEE antennas and propagation magazine, 2008. Vol. 50. № 1. P. 66–79.



УДК 544.77.032.13

Разработка чернил на основе InGaZnO для печатной микроэлектроники

Филалова Э. М., Каменева Е. И., Лизунова А. А., Иванов В. В.

Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Проведена разработка чернил на основе полупроводниковых оксидных наночастиц InGaZnO₄ для микроплоттерной печати. Произведен подбор бинарных растворителей для создания чернил с необходимыми реологическими свойствами в целях формирования транзисторов. Определены стабильность и размерные характеристики получаемых чернил.

Ключевые слова: IGZO; полупроводниковые оксидные материалы; чернила; транзисторы.

Струйная печать признана эффективным методом прямого нанесения функциональных материалов на гибкую подложку по заранее разработанным рисункам благодаря простоте обработки, низкой стоимости и большей адаптируемости для крупномасштабного изготовления электронных устройств, датчиков, светодиодов и т. д. Технология струйной печати — одна из наиболее многообещающих альтернатив фотолитографическим и вакуумным процессам, которая позволяет напрямую наносить на подложку функциональные материалы, такие как проводящие, изолирующие и полупроводниковые материалы [1].

Для порошков на основе полупроводниковых оксидных наночастиц InGaZnO₄ с различными фазовыми составами подобраны органические растворители для создания чернил. Рассмотрено несколько растворителей с различными соотношениями компонентов:

- 1) этиленгликоль и вода — 3:1;
- 2) этиленгликоль и вода — 1:1;
- 3) этиленгликоль и изопропиловый спирт — 3:1;
- 4) бутанол.

Для повышения стабильности чернил были использованы поверхностно-активные вещества (ПАВ), такие как поливинилпирролидон (ПВП) и поливинилбутираль (ПВБ).

Чернила с наилучшей стабильностью, наиболее подходящие для микроплоттерной печати, были получены на основе растворителей: буферного раствора бутанола с ПВП (рис. 1а) и буферного раствора этиленгликоля и воды в соотношении 1:1 с ПВП. Концентрация порошка IGZO в таких чернилах составляет 100 г/л или 10 весовых процентов (%). Характерный размер частиц соединения InGaZnO₄ в таких чернилах, измеренный с помощью прибора динамического рассеяния света (ДРС), равен 186,4 ± 15,2 нм, что подтверждается на изображении с растрового электронного микроскопа (РЭМ) (рис. 1б). Такие суспензии обладают стабильностью около 10 дней.

На основе полученных чернил были сформированы тонкие пленки (рис. 1в). В качестве подложки использовались пластины из оксидированного кремния с предварительной подготовкой. При подготовке подложек проводились химическая очистка и их прокаливание при температуре 400 °С. Проведена оценка морфологии пленок

с помощью оптического профилометра (рис. 1з). Можно заметить, что покрытие сформировано с равномерным распределением наночастиц по подложке. Также при высыхании пленки происходило формирование так называемого эффекта кофейного пятна [2]. Высота такой пленки составляла $2,25 \pm 0,05$ мкм.

Таким образом, найдены оптимальные растворители (бутанол, этиленгликоль и вода) и ПАВ (ПВП) для чернил на основе соединений InGaZnO_4 , подходящие для микроплоттерной печати, в то время как для остальных растворителей наблюдалась агломерация частиц и седиментация в течение суток.

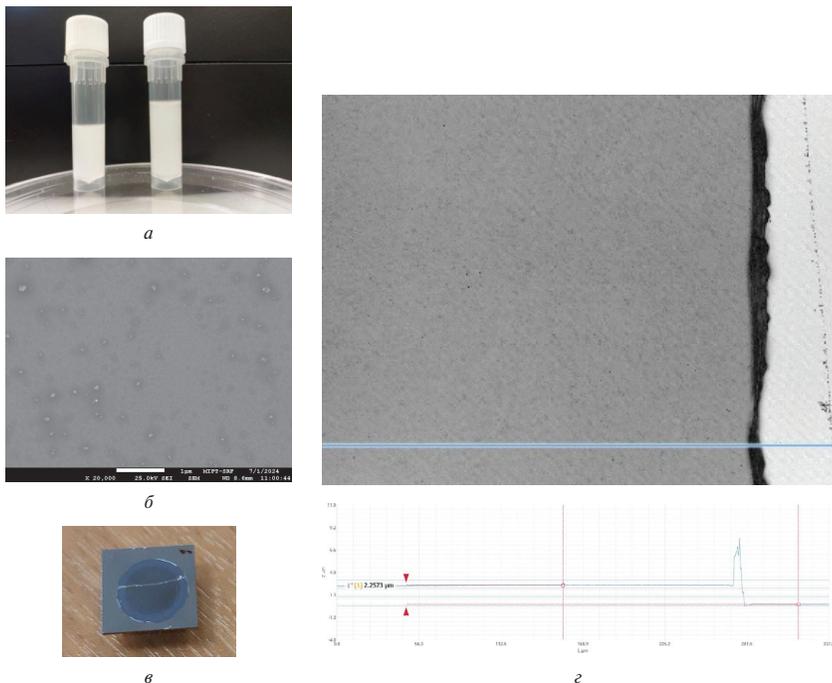


Рис. 1. Чернила с концентрацией InGaZnO_4 100 г/л в буферном растворе бутанола (а); РЭМ-изображение наночастиц InGaZnO_4 (б); фотография пленки на кремниевой подложке (в); изображение пленки, полученной на оптическом профилометре (з)

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560.

Литература

1. Kim G. H., Kim H. S., Shin H. S., Du Ahn B., Kim K. H., Kim H. J. Inkjet-printed In-GaZnO thin film transistor // Thin solid films, 2009. 517 (14), 4007–4010.
2. Nayak L., Mohanty S., Nayak S. K., Ramadoss A. A review on inkjet printing of nanoparticle inks for flexible electronics // Journal of Materials Chemistry C, 2019. 7 (29), 8771–8795.



УДК 621.039.624

Влияние режимов магнетронного напыления на свойства мемристоров, изготовленных из ZrO_2

Шулаев Н. А., Бобылев А. Н., Губин А. А., Удовиченко С. Ю.

Лаборатория мемристорных материалов, Центр природовдохновленного инжиниринга, школа естественных наук, Тюменский государственный университет

*625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
n.a.shulaev@utmn.ru*

Исследовано влияние режимов магнетронного напыления активного слоя мемристоров из диоксида циркония на вольт-амперные характеристики изготавливаемых устройств. Обнаружена нелинейная зависимость характеристик рельефа поверхности и электрических свойств мемристоров от скорости осаждения тонких пленок ZrO_2 .

Ключевые слова: мемристор; тонкие пленки; магнетронное распыление; диоксид циркония.

Электрические и эксплуатационные характеристики мемристоров в основном зависят от свойств пленок активного слоя, включая рельеф его поверхности. Использование метода магнетронного распыления обеспечивает гибкий контроль за процессом изготовления тонкопленочных структур, что позволяет варьировать многие параметры. Получение оптимальных характеристик мемристора сопровождается подбором режимов изготовления [1]. В связи с этим проведено исследование зависимости вольт-амперных характеристик (ВАХ) готовых устройств от скорости осаждения стехиометрических пленок ZrO_2 , являющегося одним из перспективных материалов [2].

Электроды и активные слои мемристоров осажены через фотополимерные маски, изготовленные методом электронно-лучевой литографии. Экспонирование производилось в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JSM-6510 с помощью приставки и ПО Nanomaker. Для каждого режима напыления измерение ВАХ осуществлялось для наборов мемристоров из шести штук с топологией кроссбар, выполненных на одной подложке. Контактные площадки размером 40×40 мкм и нижние электроды шириной 1 мкм выполнены из вольфрама, верхние электроды шириной 1 мкм изготовлены из титана с защитным слоем из нитрида титана.

Исследование режимов распыления и изготовление пленок активного слоя проводилось в модифицированном магнетронном модуле комплекса «Нано-Фаб-100» при давлении 0,15 Па в режиме стабилизации по току. Для получения стехиометрического диоксида циркония при различных скоростях осаждения варьировалась мощность магнетронного разряда, а контроль стехиометрии осуществлялся путем изменения содержания кислорода в рабочей камере.

Изготовление активного слоя мемристоров проводилось при трех выбранных режимах (табл. 1). Состав пленок определен методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии для пленок толщиной 150 нм при помощи приставки Oxford Instruments X-Max 20 к СЭМ.

Съемка и анализ морфологии поверхности для пленок, осажденных на отдельную кремниевую подложку одновременно с напылением активного слоя



мемристоров, проводились атомно-силовым микроскопом NT-MDT NTegra и ПО Nova.

Образцы имели зеренную структуру с характерными размерами, приведенными в табл. 1.

Измерения вольт-амперных характеристик показали различия электрических свойств мемристоров с разной морфологией активного слоя.

Кривые ВАХ использовались для расчета коэффициентов сопротивления R_{off}/R_{on} при напряжении 0,1 В для каждого образца (табл. 1).

Таблица 1. Режимы изготовления активного слоя мемристоров на основе ZrO_2 и их параметры

№	I, А	R, Å/с	Q(O ₂), sccm	C(O/Zr)	Средний размер зерен, нм	R_{off}/R_{on}
1	0,3	0,1	6	2,03	80	2,19
2	0,6	0,21	11	1,98	45	16,45
3	1	0,33	18	2,03	90	4,16

Таким образом, определено, что существует оптимум скорости осаждения 0,21 Å/с, при котором реализуется максимальное отношение предельных сопротивлений R_{off}/R_{on} , равное 16.45.

Результаты могут быть использованы при разработке промышленной технологии магнетронного осаждения тонких пленок оксидов металлов для твердотельных мемристоров.

Литература

1. Simanjuntak F. M., Ohno T., Samukawa S. Film-nanostructure-controlled inerasable-to-erasable switching transition in ZnO-based transparent memristor devices: sputtering-pressure dependency // ACS Applied Electronic Materials, 2019. Vol. 1. № 11. P. 2184–2189.
2. Yuan Y., Cao X., Sun Y., Su J., Liu C., Cheng L., Li Y., Yuan L., Zhang H., Li J. Intrinsic mechanism in nonvolatile polycrystalline zirconium oxide sandwiched structure // J. Mater. Sci.: Mater. Electron., 2017. Vol. 29. № 3. P. 2301–2306.



УДК 537.525

Анализ влияния добавки благородных и молекулярных газов на электрофизические параметры тлеющего разряда постоянного тока трихлорида бора

Гришков А. Э., Мурин Д. Б.

*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7*

Проведено экспериментальное исследование электрофизических параметров тлеющего разряда постоянного тока трихлорида бора в зависимости от внешних параметров разряда в широком диапазоне условий. Показано, что величина температуры газа линейно возрастает с ростом давления газа и тока разряда. Поведение приведенной напряженности электрического поля при малых давлениях типично для электроотрицательных и инертных газов. Исследовано влияние благородных и молекулярных газов на электрофизические параметры трихлорида бора. Показано, что величина температуры газа во всех исследуемых смесях, кроме смеси BCl_3/Cl_2 , уменьшается с ростом доли второго газа в смеси. Установлено, что приведенная напряженность электрического поля во всех исследованных смесях, кроме смеси BCl_3/Cl_2 , плавно уменьшается от значения чистого BCl_3 до значений чистых благородных или молекулярных газов.

Ключевые слова: плазма; трихлорид бора; аргон; гелий; хлор; кислород; водород; электрофизика; напряженность; температура.

В настоящее время плазма хлорсодержащих газов и смесей на их основе активно применяется в технологии микро- и нанoeлектроники при проведении процессов очистки и размерного травления поверхности полупроводниковых пластин и функциональных слоев интегральных микросхем. Одним из таких хлорсодержащих газов является трихлорид бора. Целью данной работы является анализ влияния благородных и молекулярных газовых добавок на электрофизические параметры плазмы трихлорида бора.

Эксперименты по исследованию параметров и свойств смесей трихлорида бора с благородными и молекулярными газовыми добавками проводились на плазмохимической установке проточного типа. В качестве внешних параметров разряда выступали ток разряда и состав газа. Трихлорид бора, аргон, гелий и кислород набирали из баллона с маркой «чистый». Газообразный хлор получали термическим разложением хлорной меди в вакууме. Водород получали с помощью генератора водорода «Кулон-6». Для измерения напряженности электрического поля был использован двухзондовый компенсационный метод. Температура газа, необходимая для определения приведенной напряженности электрического поля, определялась путем решения уравнения теплового баланса реактора с использованием экспериментальных данных по температуре наружной стенки. Измерение температуры наружной стенки проводилось с помощью хромель-копелевой термопары.

Эксперименты показали, что увеличение доли всех исследуемых газовых добавок (кроме смеси BCl_3/Cl_2) в смеси с BCl_3 приводит к уменьшению осевой напряженности электрического поля и сопровождается снижением удельной мощности,



вкладываемой в разряд, и температуры газа. Исключение составила смесь BCl_3/Cl_2 , в которой ранее упомянутые параметры увеличивались. Было установлено, что приведенная напряженность электрического поля в плазме всех исследуемых смесей слабо зависит от тока разряда, а при увеличении доли Ar , He , H_2 , O_2 плавно уменьшается от значений, соответствующих чистому BCl_3 , до значений, соответствующих чистым Ar , He , H_2 , O_2 . Предположительно такой характер обусловлен снижением эффективности гибели электронов в процессе диссоциативного прилипания к молекулам BCl_3 .

Литература

1. Rooth J. R. Industrial plasma engineering. Philadelphia: IOP Publishing LTD, 1995. Vol. 1. 545 p.



УДК 007.90:003.5 + 001.8

Сравнение физико-химических свойств фторидов и оксидов металлов для применения в технологии микроэлектроники

Орлов В. О.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

vorlov@niime.ru

В работе рассматривается применение CaF_2 для технологии микроэлектроники, а также сравнение физико-химических свойств CaF_2 с другими материалами.

Ключевые слова: фториды; оксиды; УФ- и ИК-спектроскопия.

Интерес к фтористым соединениям металлов (как щелочных, так и щелочноземельных) был обусловлен прежде всего их химической устойчивостью в сравнении с другими галоидными соединениями этих же металлов. Фториды — химические соединения фтора с другими элементами. Фториды известны для всех элементов, кроме гелия и неона. К фторидам относят как бинарные соединения — ионные фториды (соли фтороводородной кислоты и металлов, ковалентные фториды переходных металлов в высших степенях окисления и фториды неметаллов), так и сложные неорганические соединения (фторангидриды кислот, комплексные фториды, гидрофториды металлов, фторированный графит). Оксиды делятся на несколько групп: кислотные, основные, амфотерные и несолообразующие. Кислотные оксиды соответствуют кислотам, основные — основаниям, амфотерные — амфотерным гидроксидам. Несолообразующие оксиды не соответствуют ни кислотам, ни основаниям [1].

Фторид кальция — CaF_2 — один из фторидов металлов второй группы периодической системы. CaF_2 — широко распространенный материал для УФ- и ИК-спектроскопии в диапазоне длин волн от 0,15 до 9 мкм и для лазерных приложений. В настоящее время проводится активный поиск новых изолирующих материалов для использования в полупроводниковой микроэлектронике в качестве альтернативы диоксиду кремния. При этом внимание уделяется не только оксидам металлов, таким как Al_2O_3 , HfO_2 , La_2O_3 , но и другим диэлектрикам, принципиально отличающимся от них по структуре и свойствам [2]. Среди рассматриваемых фторидов наилучшими характеристиками обладает CaF_2 : высокая радиационная стойкость, прозрачность в ВУФ-области спектра, однородность показателя преломления, отсутствие гигроскопичности. CaF_2 может использоваться в электронике при создании различных устройств. Например, структуры с CaF_2 интересны в контексте поиска новых изоляторов с высокой диэлектрической проницаемостью, которые могли бы быть использованы как альтернатива SiO_2 в обычных МДП-транзисторах [3, 4].

Применение CaF_2 может стать актуальной темой будущих исследований в микроэлектронике.

Литература

1. Бокарев В. П. Влияние деформирования под давлением на физико-химические свойства неорганических фторидов и некоторых других соединений: диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук. — Москва, 1988. — 177 с. EDN QIKNDJ.

2. Sokolov N. S., Kaveev A. K., Krupin A. V. et al. High insulating quality CaF_2 pseudomorphic films on Si(111) // Applied Physics Letters, 2007. Vol. 90. № 14. P. 142909. DOI: 10.1063/1.2719610. EDN LKTCMP.
3. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41. EDN ZUQSZZ.
4. Красников Г.Я., Бокарев В.П. Поверхностная энергия и огранка кристаллов элементарных полупроводников и некоторых других веществ // Доклады Академии наук, 2002. — Т. 382. — № 2. — С. 225–229. EDN JQCHNS.



УДК 621.319.5

Разработка электростатического прижима для оборудования микроэлектроники

Трактирщиков В. С.^{1,2}, Ширяев М. Е.³, Корячко В. В.^{1,2}

¹ АО «НПП «ЭСТО»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5/1
v.s.traktirschikov@nppesto.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

³ ООО «ЭСТИКА»

124681, г. Москва, г. Зеленоград, к. 237, кв. 95

В процессе разработки конструкций и технологии производства столов с электростатическим прижимом (ЭСП) разрабатывается экспериментальный стенд, исследуются материалы, конструкции и само явление электростатического удержания пластин в условиях технологических процессов.

Ключевые слова: электростатический прижим; электростатическое крепежное устройство; электростатическое удержание; технологический стол.

Увеличение степени интеграции ИМС способствует применению более совершенных узлов оборудования микроэлектроники. Для фиксации пластин на технологическом столе применяются прижимы различных типов. Электростатический прижим позволяет достигать равномерного охлаждения, усилия удержания пластины, ее выравнивания, отсутствия кромок и трущихся деталей, быстрой смены пластин. Ввиду перечисленных преимуществ применение данного типа фиксации подложек становится обязательным для современных установок.

Рынок электростатических прижимов для пластин является важнейшим сектором промышленности полупроводникового оборудования, включающим в себя разработку, производство и применение этих устройств [1]. В Российской Федерации применяются столы с электростатическим прижимом иностранного производства. Освоение процессов разработки и производства ЭСП позволяет увеличить автономность и компетентность российской микроэлектроники.

На сегодняшний день имеется множество конструкций ЭСП. По количеству электродов их можно классифицировать как монополярные, биполярные и мультиполярные. По материалу диэлектрика ЭСП можно разделить на кулоновский тип и тип Джонсена — Рахбека [2]. Выбор конкретного типа ЭСП зависит от особенностей технологической задачи. Для плазмохимического травления в вакууме обычно применяется монополярный электростатический прижим. Для ионной имплантации важно отсутствие дополнительного смещения на обрабатываемой пластине, для чего применяется электростатический прижим с несколькими электродами, напряжение на которые подается с определенной частотой [3, 4].

Основные тенденции развития [1]:

- создание передовых материалов для повышения термостабильности, производительности и снижения загрязнений;
- достижение совместимости с передовыми технологиями;
- добавление интеллектуальных функций для контроля параметров и своевременного обслуживания.

Однако разработка и изготовление подобных устройств сопряжены со многими трудностями, которые необходимо преодолеть при внедрении электростатических прижимов в российскую промышленность.

Среди трудностей производства можно выделить следующие:

- отсутствие подрядчиков на единичные заказы;
- трудности формирования прочной слоевой керамической структуры высокой плоскостности;
- отсутствие достаточного опыта проектирования, производства и применения данного устройства.

Трудности внедрения отечественных ЭСП включают в себя:

- экономическую обоснованность;
- технологическую обоснованность;
- отсутствие системы обслуживания и ремонта;
- отсутствие исчерпывающего модельного ряда;
- отсутствие подтверждений качества и надежности отечественных устройств.

Компании АО «НПП «ЭСТО» и ООО «ЭСТИКА» занимаются разработкой серии столов с ЭСП для различных технологических процессов. При разработке выполняются исследования явления электростатического удержания, материалов и конструкций ЭСП. Для исключения недостатков примитивных экспериментальных столов компанией изготавливается стенд для прямого измерения усилия прижима в технологической среде.

Полученные в процессе исследований результаты позволяют формировать теоретическую базу для проектирования и производства столов с электростатическим прижимом.

АО «НПП «ЭСТО» уже внедрило собственный монополярный электростатический прижим в оборудование ПХТ.

Литература

1. Verified market reports: сайт. Вашингтон, 2023. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/electrostatic-chucks-for-wafer-market> (дата обращения: 09.06.2024).
2. Sun Y., Cheng J., Lu Y., Hou Y., Ji L. Design space of electrostatic chuck in etching chamber // Journal of Semiconductors, 2015. Vol. 36. № 8. P. 084004.
3. Shim G. I., Yamauchi T., Sugai H. Plasma effects on electrostatic chuck characteristics on capacitive RF discharge // Plasma and Fusion Research, 2007. Vol. 2. P. 044–044.
4. Kalkowski G., Risse S., Müller S., Harnisch G. Ultraplanaire Elektrostatistische Chucks für Next-Generation-Lithographie // Fraunhofer IOF Jahresbericht, 2005.



УДК 537.525

Кинетика травления кремния в тлеющем разряде тетрафторметана

Чесноков И. А., к. х. н. Мурин Д. Б.

*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7
mordvIncs@gmail.com*

Проведено исследование влияния времени травления и внешних параметров плазмы на скорость травления кремния. Показано, что зависимости убывали масс носят линейный характер, что свидетельствует о стационарном режиме протекания процесса травления. Установлено, что зависимости скоростей травления кремния при увеличении давления газа и тока разряда проходят через максимум и выходят на стационар. Получены и проанализированы спектры излучения тлеющего разряда тетрафторметана при травлении кремния. Предположено, что зависимости интенсивностей линий и полос от внешних условий разряда определяются возбуждением излучающих состояний при прямых электронных ударах, при этом их поведение хорошо согласуется с характером зависимостей скорости травления при тех же условиях.

Ключевые слова: плазма; тлеющий разряд; тетрафторметан; кремний; кинетика; скорость травления; интенсивности излучения; активные частицы; излучательные состояния; спектральный контроль.

Фторсодержащие газы широко используются для создания плазмы при обработке кремния в процессе изготовления интегральных микросхем. Одним из методов контроля таких процессов является оптическая эмиссионная спектроскопия. Целью данного исследования было изучение влияния различных параметров плазмы на скорость травления кремния в тлеющем разряде постоянного тока тетрафторметана, а также анализ эмиссионных спектров и определение основных источников излучения.

Для исследования взаимодействия плазмы тетрафторметана с кремнием в условиях тлеющего разряда постоянного тока использовался стеклянный прочный плазмохимический реактор цилиндрической формы (внутренний диаметр 3,4 см, длина зоны разряда 40 см). Внешними (регулируемыми) параметрами разряда выступали ток разряда (5–75 мА), давление (20–200 Па) плазмообразующего газа. Тетрафторметан набирался в хлорвиниловую емкость, откачанную до давления ~1 Па, из металлического баллона с маркой «чистый». Давление контролировалось U-образным масляным манометром. Для травления использовались фрагменты полированных пластин кремния *n*-типа (средняя площадь 1 см², толщина 400 мкм). Образцы располагались в области положительного столба разряда, температура образца контролировалась по температуре подложкодержателя. Определение скоростей травления осуществлялось гравиметрически, по изменению массы образца до и после обработки. Взвешивание образцов проводилось на лабораторных аналитических весах CAUW 120 D. Эмиссионные измерения были реализованы непосредственно с использованием плазмохимического реактора с помощью спектрометров фирмы Avantes AvaSpec, рабочий интервал длин волн — 200–1000 нм [1].



В ходе ряда экспериментов были получены зависимости убыли массы, скорости травления от времени обработки, давления газа, тока разряда, температуры образца. В эмиссионных спектрах были обнаружены атомарные и молекулярные компоненты.

Литература

1. Пирс Р., Гейдон А. Отождествление молекулярных спектров. — М.: изд. иностр. лит., 1949. — 540 с.



УДК 546.264, 539.2

Модельно-аналитическое исследование электромеханических свойств гибридных органосиликатных пленок

Цепкин М. В.^{1,2}, Резванов А. А.^{1,2}

¹ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
mtsepkin@niime.ru*

² *АО «НИИМЭ»*

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

При помощи моделирования из первых принципов и аналитических расчетов была получена информация о влиянии концентраций терминальных метильных и бензольных мостиковых групп в органосиликатном диэлектрике на механические и диэлектрические характеристики.

Ключевые слова: low-k; диэлектрическая постоянная; моделирование из первых принципов; мостиковые группы; терминальные группы.

На сегодняшний день одной из важнейших задач микроэлектронной промышленности является увеличение быстродействия работы интегральных схем (ИС). Долгое время этого удавалось достичь путем масштабирования активных элементов. Тем не менее время задержки в системе металлизации начинает все сильнее и сильнее превалировать над временем переключения транзистора [1].

Резистивно-емкостная задержка препятствует дальнейшему увеличению скорости работы элементов интегральных схем. Эту задержку можно уменьшить, заменив алюминиевый проводник медным, уменьшив сопротивление; ее также можно уменьшить, заменив межслойный диэлектрик на материалы с низкой диэлектрической постоянной, тем самым уменьшив емкость.

Для уменьшения диэлектрической проницаемость используются два основных метода. Первый — это легирование добавками, образующими менее полярные связи, чем Si-O. Второй — это уменьшение плотности путем увеличения пористости материала. Один из наиболее важных критериев современных low-k-диэлектриков — это механическая стабильность, потребность в которой обусловлена внедрением меди в качестве электрического проводника в разводку микросхем. На конференции ИТС IEEE в Японии ведущими компаниями по производству микроэлектроники были озвучены требования в 5–6 ГПа для модуля Юнга. Из всего вышесказанного следует, что необходимо создать материал, обладающий повышенной механической прочностью, но при этом сохраняющий низкую диэлектрическую проницаемость. Для соблюдения подобного баланса требований можно влиять на три основных параметра исследуемого low-k материала, а именно пористость и концентрацию метильных групп, положительно влияющих на диэлектрическую проницаемость, а также концентрацию бензольных мостиковых групп, положительно влияющих на механические характеристики материала [2].

Основной целью этой работы является разработка способа определения физических характеристик гибридных органосиликатных пленок, в частности диэлектрической проницаемости и модуля Юнга, в зависимости от различных параметров состава материала, например соотношения концентраций, или замена одного

компонента на другой. Для расчета диэлектрической проницаемости диэлектрика с бензольными группами используется аналитический подход с применением уравнения Клаузиуса—Моссотти, в самой сложной вариации которого учитывается влияние как бензольных, так и метильных групп. Для оценки механической прочности были сформированы разные образцы с разной концентрацией бензольных групп 25, 45, 60, 100 %, для которых экспериментальным методом был установлен модуль Юнга [3]. Благодаря анализу экспериментальных данных удалось установить, что модуль Юнга слабо меняется при низкой концентрации и существенно возрастает при прохождении порога перколяции. Предложено феноменологическое объяснение: введение пористости делает матрицу пленки более эластичной, и матрица приобретает возможность более эффективной самосборки [4]. При помощи программного пакета Quantum ESPRESSO было проведено моделирование из первых принципов структуры исследуемого low-k-диэлектрика для анализа его электромеханических характеристик и сопоставления их с экспериментальными данными.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Ovchinnikov I. S., Vishnevskiy A. S., Seregin D. S., Rezvanov A. A. et al. Evaluation of Mechanical Properties of Porous OSG Films by PFQNM AFM and Benchmarking with Traditional Instrumentation // *Langmuir*, 2020. Vol. 36. № 32. P. 9377–9387.
3. Резванов А. А. и др. Гибридные органосиликатные low-k-диэлектрики с бензольными мостиковыми группами с повышенной механической прочностью и малым размером пор для современной BEOL металлизации // РФФИ, 2023. — С. 13.
4. Fujita S., Inagaki S. Self-organization of organosilica solids with molecular-scale and mesoscale periodicities // *Chemistry of Materials*, 2008. Vol. 20. № 3. P. 891–908.



УДК 538.975

Электронные свойства сверхтонких слоев MoS_2 , полученных методом сульфидизации

Козодаев М. Г., к. ф.-м. н., Маркеев А. М., д. т. н.

Центр коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9 kozodaev.mg@mipt.ru

Разработан АСО-процесс роста пленок MoO_3 , позволяющий получать химически чистые сплошные пленки толщиной менее 3 нм. Показано, что их последующая сульфидизация приводит к образованию MoS_2 , морфология которого определяется толщиной исходной оксидной пленки. На основе полученных пленок MoS_2 толщиной 2,5 и 3,5 нм были изготовлены полевые транзисторы и исследованы их основные характеристики. Показано, что толщина и морфология MoS_2 существенно влияют на электронный транспорт, но основным лимитирующим параметром является контактное сопротивление в областях стока-истока.

Ключевые слова: дихалькогениды переходных металлов; атомно-слоевое осаждение; сульфидизация; полевой транзистор; электронный транспорт; подвижность носителей; контактное сопротивление.

Двумерные дихалькогениды переходных металлов (TMDC), в частности MoS_2 , в настоящее время привлекают большой интерес из-за их впечатляющих электрических и оптических свойств [1–2], но реализация их полного потенциала осложнена ввиду ряда причин. В частности, помимо новой физики этих материалов в последнее время также стали широко обсуждаться и вопросы их синтеза [3]. На текущий момент большинство экспериментальных работ направлено на получение сплошных монослойных пленок методом MOCVD, поскольку они представляют наибольший интерес для полевых транзисторов. Несмотря на превосходное качество получаемых пленок, процессы MOCVD чрезвычайно чувствительны к входным параметрам, что осложняет их воспроизводимость [4]. В этой связи существенный интерес представляют альтернативные методы синтеза, в частности сульфидизация предварительно выращенной «затравочной» пленки [5]. Благодаря своей простоте и экономичности данный способ выглядит привлекательным с точки зрения производства. Как правило, пленки TMDC, полученные сульфидизацией, являются нанокристаллическими и их электронные свойства уступают таковым, полученным при помощи MOCVD. Тем не менее для многих задач электронные свойства играют второстепенную роль [6], поэтому нанокристаллические пленки TMDC по своей сути являются существенно иным объектом для исследования и заслуживают особого внимания.

Вторым критически важным моментом технологии двумерных слоев TMDC является создание к ним качественных металлических контактов. Несовпадение уровней Ферми металла стока-истока и пленки TMDC приводит к формированию барьеров, препятствующих инжекции носителей, что обуславливает нелинейность

вольт-амперных характеристик и наличие контактных сопротивлений [7]. Данная проблема имеет статус открытой не только для «идеальных» монокристаллических флейков MoS_2 ввиду стохастического разброса их свойств, но и даже для более сложных нанокристаллических пленок. Подходам к решению обозначенной проблемы на текущий момент посвящено всего несколько работ [8].

Соответственно, в текущей работе мы изучили электрические свойства полевых транзисторов на основе нанокристаллических пленок MoS_2 , полученных методом сульфидизации MoO_3 , и оценили влияние контактного сопротивления на их характеристики. Показано, что увеличение толщины пленки MoS_2 на 1 нм приводит к увеличению тока в выключенном состоянии примерно на два порядка величины, то есть ухудшает электростатический контроль пленки затвором, в то время как ток во включенном состоянии практически не изменяется и определяется исключительно контактным сопротивлением. Исследование температурной зависимости вольт-амперных характеристик показало, что величины барьеров сток-исток/ MoS_2 зависят от толщины MoS_2 , то есть инжиниринг контактов не является инвариантным.

Работа выполнена при поддержке проекта государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 075-03-2024-117 от 17.01.2024).

Литература

1. Choi W., Choudhary N., Han G. H., Park J., Akinwande D., Lee Y. H. Recent development of two-dimensional transition metal dichalcogenides and their applications // *Materials Today*, 2017. 20 (3). P. 116–130.
2. Sebastian A., Pendurthi R., Choudhary T. H., Redwing J. M., Das S. Benchmarking monolayer MoS_2 and WS_2 field-effect transistors // *Nature Communications*, 2021. 12, 693.
3. Robinson J. A. Perspective: 2D for beyond CMOS // *APL Materials*, 2018. 6, 058202.
4. Lee D. H., Sim Y., Wang J., Kwon S.-Y. Metal-organic chemical vapor deposition of 2D van der Waals materials—The challenges and the extensive future opportunities // *APL Materials*, 2020. 8, 030901.
5. Song J.-G., Park J., Lee W., Choi T., Jung H., Lee C. W., Hwang S.-H., Myoung J. M., Jung J.-H., Kim S.-H. et al. Layer-controlled, wafer-scal. and conformal synthesis of tungsten disulfide nanosheets using atomic layer deposition // *ACS Nano*, 2013. 7. P. 11333–11340.
6. Sangwan V. K., Jariwala D., Kim I. S., Chen K.-S., Marks T. J., Lauhon L. J., Hersam M. C. Gate-tunable memristive phenomena mediated by grain boundaries in single-layer MoS_2 // *Nature Nanotechnology*, 2015. 10. P. 403–406.
7. Briggs N., Subramanian S., Lin Z., Li X., Zhang X., Zhang K., Xiao K., Geoghegan D., Wallace R., Chen L.-Q., Terrones M., Ebrahimi A., Das S., Redwing J., Hinkle C., Momeni K., Van Duijn A., Crespi V., Kar S., Robinson J. A. A roadmap for electronic grade 2D materials // *2D Materials*, 2019. 6, 022001.
8. Mahlouji R., Verheijen M. A., Zhang Y., Hofmann J. P., Kessels W. M. M., Bol A. A. Thickness and Morphology Dependent Electrical Properties of ALD-Synthesized MoS_2 FETs // *Advanced Electronic Materials*, 2022. 8, 2100781.



УДК 67.02

Технологии повышения воспроизводимости джозефсоновских переходов Al/AlOx/Al для сверхпроводниковых интегральных схем

Коршаков Н. Д.^{1,2}, к. т. н., Москалев Д. О.^{1,2}, к. т. н., Соловьева А. А.^{1,2},
Москалева Д. А.^{1,2}, Телеганов М. И.¹, Андрощук М. В.¹, к. т. н.,
Родионов И. А.^{1,2}

¹ НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18

² ВНИИА им. Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Суцевская, 22

Разработана масштабируемая технология формирования джозефсоновских переходов на 100-миллиметровых пластинах. Даны рекомендации по выбору технологических режимов процесса электронно-лучевого испарения. Проведено исследование влияния термического воздействия на электрические характеристики джозефсоновских переходов.

Ключевые слова: сверхпроводниковые интегральные схемы; джозефсоновские переходы; теневое осаждение; термический отжиг.

Сверхпроводниковые интегральные схемы на базе джозефсоновских переходов являются наиболее перспективной платформой для реализации квантового процессора благодаря их совместимости с традиционными планарными процессами микроэлектроники. За последние несколько лет на ее основе были продемонстрированы: твердотельный квантовый процессор на 54 кубитах Sycamore (компания Google) [1], 127-кубитный процессор Eagle и 1121-кубитный процессор Condor (компания IBM) [2, 3]. Основополагающим элементом сверхпроводниковых интегральных схем является джозефсоновский переход (ДП), конструктивно представляющий собой трехслойную структуру Al/AlOx/Al. Изготовление алюминиевых ДП осуществляется с применением мостовой технологии Долана, актуальной проблемой которой является воспроизводимость электрических характеристик данных структур.

В работе представлена комплексная оптимизация процесса теневого осаждения джозефсоновских переходов (ДП) для масштабирования сверхпроводниковых интегральных схем на 100-миллиметровые пластины. На основании экспериментальных исследований роста тонких пленок под углом для формирования высококачественного нижнего электрода (RMS 1 ~ нм, LER < 1,3 нм) в работе даны рекомендации по выбору технологических режимов процесса электронно-лучевого испарения: комбинация малых углов осаждения (от 0° до 30°) и толщины нижнего электрода [4]. Разработана математическая модель процесса теневого осаждения, позволяющая вносить корректировки в линейные размеры отверстия в двухслойной резистивной маске для компенсации неравномерного распределения потока испаряемого материала. Проведено исследование влияния термического воздействия на электрические характеристики ДП.

Предложенные в работе методы позволяют формировать структуры с величиной стандартного отклонения критического тока менее 4,5% для площади



переходов от $0,025 \text{ мкм}^2$ и менее 11,4% для площади $0,01 \text{ мкм}^2$ по пластине диаметром 100 мм и управлять значениями критического тока, уменьшая его в 0,5 раз и увеличивая до 3 раз по чипу.

Литература

1. Arute F. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor // Nature, 2019. Vol. 574. № 7779. P. 505–510.
2. Chow J., Dial O., Gambetta J. IBM Quantum breaks the 100-qubit processor barrier // IBM Research Blog, 2021.
3. Choi C. Q. Ibm's quantum leap: The company will take quantum tech past the 1,000-qubit mark in 2023 // IEEE Spectrum, 2023. Vol. 60. № 1. P. 46–47.
4. Moskalev D. O. et al. Optimization of shadow evaporation and oxidation for reproducible quantum Josephson junction circuits // Scientific Reports, 2023. Vol. 13. № 1. P. 4174.



УДК 538.97

Формирование металлических микроразмерных структур методом сухой аэрозольной печати с лазерным спеканием

Долгов В. А., Корнюшин Д. В., Борисов В. И., Иванов М. С., Каменева Е. И.,
Ворошилова В. А., Иванов В. В.

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

Представлены результаты по формированию высокопроводящих микроразмерных структур толщиной и шириной от 0,5 и 70 мкм соответственно методом сухой аэрозольной печати с одновременным спеканием импульсным лазерным излучением, удельное сопротивление которых составляет 220 % от кристаллического серебра.

Ключевые слова: печатная электроника; наночастицы; импульсный газовый разряд; сухая аэрозольная печать; лазерное спекание.

Методы печатной электроники демонстрируют быструю экспансию во множестве отраслей производства электронных устройств. Применение чернил для печати электронных компонентов является общепринятым, однако требует проведения ряда технологических операций для производства чернил, а также дальнейшей сушки после печати. Развивающаяся перспективная технология сухой аэрозольной печати позволяет совместить все необходимые стадии технологического процесса формирования металлического микроразмерного рисунка в одном устройстве.

Микроструктуры формировались из наночастиц серебра, синтезируемых в газоразрядной ячейке (рис. 1а). Импульсный газовый разряд между серебряными электродами инициируется в потоке инертного газа, выполняющего функцию транспорта наночастиц. В процессе транспортировки в целях получения укрупненных сферических наночастиц со средним размером порядка 70 нм из дендритоподобных агломератов со средним размером 200 нм используется лазерный оптимизатор, в котором в потоке аэрозоля агломераты под действием импульсного лазерного излучения с длиной волны 1064 нм трансформируются в сферические наночастицы, что позволяет достичь более плотной упаковки частиц при печати. Сферические наночастицы фокусируются в коаксиальном сопле с использованием фокусирующего газового потока, позволяющего получать ширину наносимой микроструктуры кратно меньше выходного диаметра сопла (рис. 1б). В процессе осаждения наночастиц на подложки в атмосфере динамического вакуума производилось параллельное их спекание импульсным лазерным излучением с длиной волны 527 нм.

Варьированием ряда параметров: скорости печати от 20 до 5000 мкм/с, количества проходов печати от 1 до 12, частоты следования лазерных импульсов от 10 до 2000 Гц и их энергии от 0 до 250 мкДж, определялись оптимальные параметры формирования высокопроводящих микроструктур.

Микроструктуры толщиной от 0,5 мкм и шириной от 70 мкм формировались на подложках из различных материалов (кремний, стекло). Абсолютное сопротивление получаемых структур измерялось четырехконтактным методом. Профили сечений микроструктур, позволяющие рассчитать удельное сопротивление,

исследовались с использованием оптического конфокального 3D-профилометра Sensofar S-неох. Качество спекания микроструктур исследовалось с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-7001F путем изучения структуры поверхности и поперечного сечения на сломе. Характерные РЭМ-снимки представлены на рис. 2.

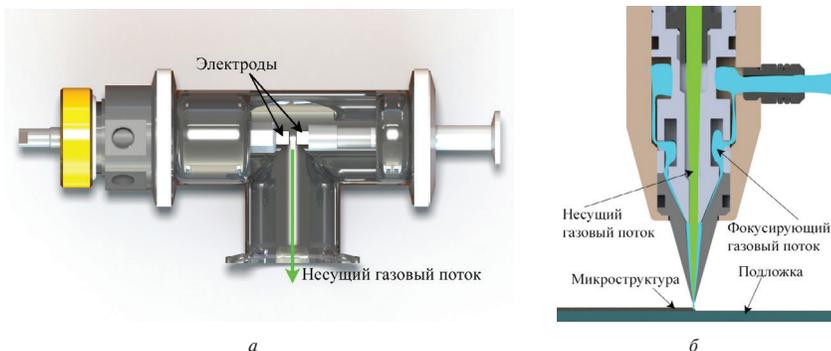


Рис. 1. Схематическое изображение синтеза наночастиц в газоразрядной ячейке (а) и сфокусированного осаждения наночастиц с использованием коаксиального сопла (б)

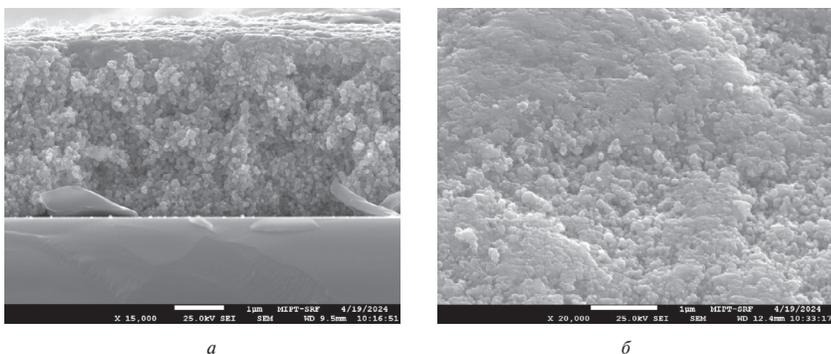


Рис. 2. РЭМ-снимки поперечного сечения микроструктуры на сломе (а) и поверхности микроструктуры (б)

По результатам исследований выявлено, что для получения высокопроводящих микроструктур сферическими наночастицами серебра со средним размером 70 нм необходимо производить формирование со скоростью 2000 мкм/с за восемь проходов с параллельным спеканием импульсным лазерным излучением с параметрами 1000 Гц, 200 мкДж и диаметром пучка 300 мкм. Таким образом, с использованием метода сухой аэрозольной печати и параллельного процесса спекания лазерным излучением было достигнуто удельное сопротивление 3,535 мкОм·см, что составляет 222% от удельного сопротивления кристаллического серебра.



В результате уменьшения скорости формирования, количества проходов, частоты следования импульсов лазерного излучения и их энергии наблюдается повышение удельного сопротивления вплоть до 390–700 % от удельного сопротивления кристаллического серебра.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560.

Литература

1. Khabarov K. et al. The influence of laser sintering modes on the conductivity and microstructure of silver nanoparticle arrays formed by dry aerosol printing // Applied Sciences, 2019. Vol. 10. № 1. P. 246.

УДК 621.382.323

Исследование и разработка технологических процессов для уменьшения длины затвора ПТШ

Маркус Д. В., Рогачёв И. А., Игнатьев О. И.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

Разработан процесс анизотропного травления диэлектрика для формирования узкой щели в диэлектрике с использованием пристеночного диэлектрика. Разработана технология уменьшения линейных размеров Т-образного затвора ПТШ. Показана возможность сформировать затвор с длиной 250 нм, используя проекционную фотолитографию.

Ключевые слова: анизотропное травление; полевой транзистор Шоттки; оптическая фотолитография; пристеночный диэлектрик.

В настоящее время широко используются монокристаллические интегральные схемы (МИС) в различных системах связи и в области СВЧ измерительной техники, работающие в миллиметровом диапазоне длин волн. Активные элементы в таких МИС представляют собой СВЧ-транзисторы, в основном это полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ) длиной 50–250 нм. Особое значение имеют работы по оптимизации технологии производства ПТШ, поскольку они являются одним из важнейших компонентов СВЧ-устройств [1].

Основное направление работы по снижению линейных размеров без использования более совершенных литографических систем — различные методы профилирования фото- или электронно-резистивной маски, поскольку органические резисты позволяют регулировать свои свойства в широких пределах, используя различные проявители, режимы засветки и термообработки, различные обработки в химических растворах или плазме кислорода.

Другим направлением выступает разработка процессов самосовмещения, где, используя проекционную фотолитографию с низкой разрешающей способностью, различными методами уменьшают технологические размеры зоны травления [1, 2, 3].

Наиболее перспективными являются разработки в области использования пристеночного диэлектрика для уменьшения длины технологической линии, поскольку они не требуют массы сложных операций, однако чувствительны к точности технологических процессов.

Результатом работ стала технология уменьшения длины затвора 1000 нм до 250 нм без использования электронно-лучевой литографии, что может существенно ускорить производство полевых транзисторов при применении разработанной технологии. Высокая скорость травления позволяет быстро формировать окно под напыление затвора, а сниженное воздействие ионной бомбардировки не повреждает активный слой полупроводника в зоне травления.

Для стабильности разработанной технологии и повторяемости параметров разработаны новые процессы равномерного послойного осаждения низконапряженного нитрида кремния и анизотропного травления нитрида кремния с контролем параметров через Парето-диаграммы и регрессионный анализ.



Литература

1. Vega R. Schottky Field Effect Transistors and Schottky CMOS Circuitry. Rochester Institute of Technology, 2006. 44 p.
2. Савченко Л., Петров М. Нанопрофилирование резистивной маски при создании Т-образного затвора СВЧ ПТШ // Вестник новгородского государственного университета, 2017. — № 7 (105). — С. 31–36.
3. Арыков В. С., Гаврилова А. М., Дедкова О. А., Кагадей В. А., Лиленко Ю. В. Формирование субмикронного затвора GaAs ПТШ с использованием четырехслойного диэлектрического макета // Микроэлектроника, 2012. — Т. 41. — № 3. — С. 181–187.

УДК 621.3.049.77

Результаты по опробованию отечественных ПАВ в технологии получения безметалльного проявителя, применяемого в микроэлектронных производствах современного уровня (180–90 нм)

Сеньченко Н. С.¹, Варламов Д. А.¹, Щербаков Н. А.¹, Курбатов В. Г.²¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
nсенченко@niime.ru² Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1

В работе представлена необходимость применения поверхностно-активных веществ для безметалльных проявителей, используемых для технологических процессов получения ИС с проектными нормами 180 нм и ниже. Изложены результаты по опробованию различных экспериментальных составов ПАВ в проявителе в лабораторных условиях. Представлено сравнение с импортным образцом ПАВ. Проведена апробация составов в технологии получения безметалльного проявителя на опытно-промышленной установке.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества; безметалльный проявитель; гидроксид тетраметиламмония; микроэлектроника; интегральные схемы.

Применение высокочистых полупроводниковых и вспомогательных материалов, модернизация технологических процессов при изготовлении современных интегральных схем и приборов способствуют развитию микроэлектроники. Переход к новому уровню проектных норм сопровождается освоением новых материалов и настройкой технологических процессов. С уменьшением топологических норм возрастают требования, предъявляемые к реагентам, используемым для фотолитографии. Высокочистый безметалльный проявитель должен отвечать высоким требованиям по концентрации основного вещества — тетраметиламмония гидроксида (ТМАГ) — $0,26111 \pm 0,0005$ моль/л, по концентрации примесей элементов — Na, Ca < 2 ppb, Al, Mg, K, Cu, Ni, Cr, Zn < 1 ppb, а также иметь регламентированное содержание частиц размером >0,3 мкм. В составе безметалльного проявителя используются поверхностно-активные вещества, необходимые для увеличения технологичности процесса — улучшения смачиваемости и однородности растекания проявителя по гидрофобной поверхности фоторезиста, увеличения скорости проявления, получения дорожек с лучшими показателями по стабильности и воспроизводимости размеров, что приводит к уменьшению брака при производстве ИС. Несмотря на малое содержание ПАВ в составе проявителя, не превышающее 0,01 масс. %, к ним предъявляются высокие требования по чистоте для обеспечения нормативных показателей проявителя [1–2].

В лабораторных условиях были проведены исследования различных экспериментальных образцов поверхностно-активных веществ для безметалльного проявителя отечественного производства, предоставленных ФИЦ ПХФ и МХ РАН.



В рамках исследования были приготовлены экспериментальные образцы проявителя с экспериментальными образцами ПАВ. В приготовленных образцах было измерено динамическое поверхностное натяжение, а также построены зависимости поверхностного натяжения от времени образования пузырька. В ходе работы было выполнено сравнение полученных результатов с данными по импортному ПАВ.

В ходе проведенных лабораторных испытаний были получены растворы безметалльного проявителя с различными образцами ПАВ, для которых построены зависимости поверхностного натяжения от времени образования пузырька (рис. 1). При сравнении экспериментальных образцов ПАВ с импортным аналогом установлено, что образец ПАВ (№ 28) имеет наиболее близкие характеристики по динамическому поверхностному натяжению с импортным аналогом.

Зависимость поверхностного натяжения σ от времени жизни пузырька t в режиме Auto для образцов № 27-31 и импортн. аналога

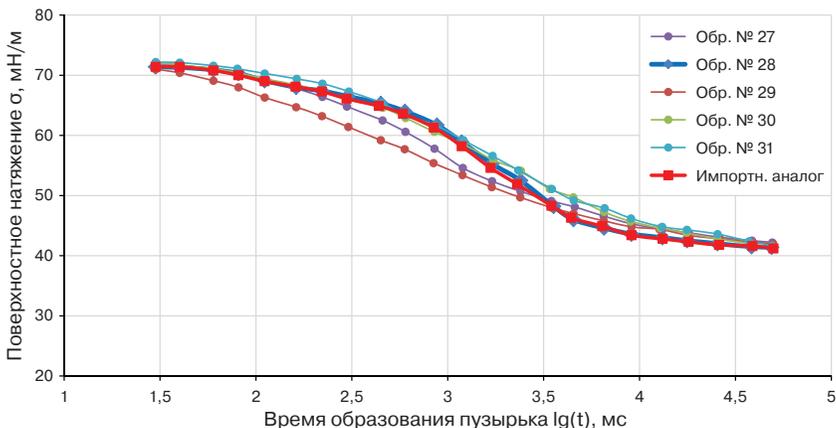


Рис. 1. Зависимости поверхностного натяжения от времени жизни пузырька для различных ПАВ в составе безметалльного проявителя

Проведенная апробация образца ПАВ № 28 как наиболее близкого к импортному аналогу в технологии получения безметалльного проявителя по результатам анализа показала, что степень чистоты по примесям элементов используемого состава отвечает предъявляемым требованиям, степень привнесения примесей минимальна и не оказывает существенного влияния на качество изготавливаемого проявителя.

Полученные в ходе работы образцы безметалльного проявителя с экспериментальным образцом ПАВ № 28 были опробованы в технологическом процессе при производстве ИС. По результатам технологического опробования было получено заключение об успешном проведении испытаний.

1. Разработанный проявитель с применением отечественного ПАВ удовлетворяет границам спецификации по дефектности при применении его на рабочих пластинах. Были получены сопоставимые результаты с проявителем, в составе которого применялся ПАВ импортного производства.

2. Внешний вид критических элементов в центре и на краях пластин при использовании проявителя с отечественным ПАВ и импортным аналогом сравним друг с другом, отличия минимальны и находятся в пределах естественного колебания процесса.
3. Проявитель с отечественным ПАВ удовлетворяет требованиям формирования фоторезистивной маски по технологии 180–90 нм.

Литература

1. Сеньченко Н. С., Варламов Д. А., Шербаков Н. А., Ранчин С. О. Отработка технологии получения безметального проявителя для микроэлектронных производств современного уровня (180–90 нм) // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-2 (119). — С. 505–507.
2. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.



УДК 658.5.012.1

Исследование продукции в целях предупреждения или выявления дефектности на различных этапах производства микроэлектроники

Рудометов Я. А.^{1,2}, Нелюбин И. В.^{1,2}, Волоховский А. Д.¹¹ ООО «НМ-Тех»124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе рассмотрено решение задачи контроля дефектности с помощью внедрения автоматических методов исследования. Описан маршрут исследования дефектов с использованием различных методов измерений. Показаны примеры решения технологических проблем.

Ключевые слова: дефектность; микроскопия; метрология; интегральная электроника.

При масштабировании размеров элементов топологического рисунка в процессе производства изделий интегральной электроники ужесточаются требования к дефектности для определения выхода годных изделий. Исторически контроль дефектности на производстве осуществлялся с помощью метода оптической микроскопии. Путем визуального осмотра участков пластины вычислялась плотность дефектов. Для субмикронных технологических норм такой способ исследования невозможен, так как оператор не в состоянии просмотреть значимую площадь пластины в требуемом увеличении. Поэтому для контроля дефектности были введены автоматические методы.

После каждого основного блока технологических операций (фотолитографии, осаждения, травления, полировки) проводятся операции обнаружения макро- и микродефектов с помощью автоматических инспекционных станций, основанных на светлопольных и темнопольных микроскопах и позволяющих в автоматическом режиме выявлять участки топологической структуры, отличающиеся от остальных аналогичных участков на пластине. Для детального исследования обнаруженных дефектов применяются специализированные установки растровой электронной микроскопии, позволяющие выйти на обнаруженный дефект с требуемой точностью. Оборудование, применяемое для контроля дефектности, должно обеспечивать автоматическое определение и классификацию дефектов на кремниевых пластинах диаметром 200 и 300 мм с топологическим рисунком и без него, иметь высокую производительность. Основными типами дефектов при производстве изделий интегральной электроники являются частицы, микроцарапины и свойственные технологическим операциям дефекты, такие как перетравы и остатки материала [1, 2].

В работе кратко рассмотрены установки автоматического контроля дефектности, принципы их работы, а также области применения. Благодаря их внедрению в технологический цикл решены задачи контроля дефектности, а именно

обнаружения дефектов, их классификации и детального анализа. Целями контроля дефектности являются поиск и устранение корневых причин их возникновения.

Приведены примеры решенных технологических проблем после основных операций производственного маршрута. На основе полученных данных был создан атлас дефектов, позволяющий быстро найти причину возникновения дефектов, обратившись к предыдущему опыту.

Проводя анализ экономической эффективности, можно утверждать, что при обнаружении дефектов на кремниевой пластине на ранних этапах технологического маршрута потери могут быть сравнимы со стоимостью чистой кремниевой пластины. При обнаружении дефектов на более поздних стадиях маршрута или невозможности обнаружения дефектов вовсе потери возрастут многократно.

Внедрение операций автоматического контроля дефектности позволяет повысить выход годных на производстве изделий интегральной электроники, разработать рекомендации и регламенты для проведения технологических процессов для предотвращения проявления дефектности, а также не потерять ресурсы, время и денежные средства на производство.

Литература

1. Hao H. et al. Surface Defect Classification in Silicon Wafer Manufacturing Using Linear-Based Channeling and Rule-Based Binning // *Journal of Material Sciences & Engineering*, 2021. Vol. 10:8.
2. Hao H., Kari U. Surface Defect Classification in Silicon Wafer Manufacturing Using the Linear-Based Channeling and Rule-Based Binning Algorithms // *Advanced Materials Research*, 2022. 1170(9):1–10.



УДК 533.933

Влияние технологических параметров процесса на энергетический спектр ионов в индуктивно-связанной плазме: моделирование и исследование IEDF в смесях с аргоном

Халилуллин Р. Р.^{1,2}, Кузьменко В. О.¹, Мяконых А. В.¹

¹ Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

² МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

В работе проведено моделирование функции распределения ионов по энергиям в индуктивно-связанной плазме при различных параметрах процесса в смеси Ag/Xe. Результаты показали, что важен точный контроль параметров процесса для достижения селективности параметров процесса, их синергии и контроля распыления.

Ключевые слова: индуктивно-связанная плазма; функция распределения ионов по энергиям; ВЧ-смещение; смесь Ag/Xe; распыление.

В современных приложениях микро- и нанoeлектроники селективность процессов травления и их синергия играют важную роль, особенно в контексте атомно-слоевого травления. Эффективность этих процессов зависит не только от средней энергии ионов, но и от ширины их энергетического спектра. Поиск возможностей управления шириной энергетического спектра при травлении является одной из ключевых задач для успешной реализации наноразмерных структур, поскольку ионно-стимулированные реакции травления материалов в непрерывных и циклических процессах важны при микроструктурировании и создании микро- и нанoeлектроники [1]. В литературе имеются сведения о широком спектре процессов атомно-слоевого травления [2], которые могут быть оптимизированы подбором параметров разряда. Например, в работе [3] изменением внешних параметров разряда удалось повысить синергию процесса атомно-слоевого травления при контролируемом и одинаковом потоке ионов.

В данной статье исследуется функция распределения ионов по энергиям (IEDF) в плазме аргона и смеси аргона с благородными газами в реакторах с индуктивно-связанной плазмой (ICP) при различных технологических параметрах процесса. Для исследования была разработана численная гидродинамическая модель плазменного слоя, учитывающая подвижность ионов под воздействием электрического поля [4] для расчета при низких давлениях. Расчеты проводились с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics на основании концентраций электронов и их температур, полученных из эксперимента методом зонда Ленгмюра, а также температуры газа, измеренной методом оптической актинометрии в установке плазмохимического травления Oxford Plasmalab System 100. Функция распределения ионов по энергиям рассчитывалась модифицированной моделью трассировки частиц методом, близким по условиям к методу Монте-Карло.

В ходе работы было изучено влияние различных параметров процесса и проведена серия расчетов при различных внешних (задаваемых) условиях разряда,

а также при различных условиях, контролирующих потоки и энергии бомбардирующих ионов, определяемых режимом работы генератора смещения. Результаты показали, что IEDF сильно зависит от амплитуды и частоты напряжения смещения. Зависимость IEDF выражена слабее при изменении давления и концентрации в камере реактора. При проведении моделирования с различными параметрами напряжения смещения был проведен сравнительный анализ распределения энергий ионов в плазме смеси аргона и ксенона. Выяснено, что изменения параметров напряжения смещения сильнее влияют на поведение ионов аргона, чем на ионы ксенона, что отражается на скорости распыления образца соответствующими ионами.

Полученные результаты необходимы для оптимизации процессов обработки материалов в микро- и нанoeлектронике, а также для разработки новых и перспективных процессов травления. Благодаря контролю энергии ионов, достигающих пластины, можно получить высокие параметры селективности травления и синергии атомно-слоевых процессов структурирования.

Работа проведена в молодежной лаборатории функциональных диэлектриков в рамках государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН Минобрнауки Российской Федерации по теме № FFNN-2022-0020.

Литература

1. Bogdanova M., Lopaev D. et al. Virtual IED sensor for df rf CCP discharges // Plasma Sources Sci. Technol., 2021. Vol. 30. № 7.16, № 6 (2). P. 632–639.
2. Kuzmenko V., Lebedinskij Y., Miakonkikh A., Rudenko K. Selective atomic layer etching of Al_2O_3 , AlN_x and HfO_2 in conventional ICP etching tool // Vacuum, 2023. Vol. 207. Art. № 111585. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111585.
3. Kuzmenko V., Melnikov A., Isaev A., Miakonkikh A. Revealing the controlling mechanisms of atomic layer etching for high-k dielectrics in conventional inductively coupled plasma etching tool // Journal of Vacuum Science and Technology, 2024. A, 42, (accepted).
4. Robertson S. and Sternovsky Z. Monte Carlo model of ion mobility and diffusion for low and high electric fields // J. Phys. Rev., 2003. E. 67.



УДК 621.3.049.77

Исследование аморфных диэлектрических пленок интегральных микросхем методами электронной микроскопии

Романенко П. М.^{1,2}, Румянцев А. В.¹, Волков Р. Л.¹, Макеева О. В.²¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*² *ООО «НМ-Тех»**124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
computer500001999@mail.ru*

CVD-методикой были получены и методами ПРЭМ и РСМА исследованы применяемые в КМОП-технологии производства ИС с проектными нормами ≥ 130 нм аморфные диэлектрические пленки с оценкой их идентификации в составе многослойной структуры и последующим анализом в целях модернизации технологических процессов.

Ключевые слова: CVD; аморфные диэлектрические пленки; электронная микроскопия; границы раздела; состав; барьерные свойства; оксид кремния; оксинитрид кремния; нитрид кремния; стехиометрия пленки.

В настоящий момент мировая микроэлектронная отрасль сталкивается в процессе запуска новых производственных площадок с огромным числом проблем, требующих анализа и решения. Среди них необходимо выделить связанные с разработкой и обеспечением воспроизводимости параметров отдельных технологических процессов в рамках маршрутов формирования изделий — зоной ответственности инженеров-технологов направлений производственного цикла. В результате решения этих задач должна быть поставлена технология кристалльного производства с требуемыми топологическими нормами.

Одной из наиболее востребованных в мире технологий производства различного рода и назначения ИС является полупроводниковая КМОП-технология [1]. Помимо прочих технологических процессов производственного цикла в ней, как на этапе FEOL, так и в особенности на стадии BEOL, активно используется CVD-метод формирования различных пленок — химическое осаждение из газовой фазы [2, 3].

В рамках данной работы методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа было проведено исследование сформированных в ООО «НМ-Тех» в результате PECVD- и HDP-CVD-методик диэлектрических ФС, применяемых в КМОП-технологии. Слои с толщинами около 200 нм изучались в конфигурации полученной в результате послойного осаждения на кремниевой подложке ориентации (100) многослойной структуры. Для обеспечения ее адгезионной стойкости до осаждения сухим термическим окислением на подложке был сформирован слой оксида кремния SiO_2 толщиной около 100 нм. В ЦКП «ДММН» (МИЭТ) на структуру посредством магнетронного напыления был нанесен слой хрома толщиной около 250 нм для устранения нежелательного «эффекта зарядки» диэлектриков под воздействием электронного пучка в процессе подготовки образца для исследования с использованием ФИП в электронно-ионном микроскопе Helios NanoLab 650. После его прецизионного утонения с контролем протекания процесса в неразрушающем электронном режиме диэлектрическая структура была

подвергнута воздействию высокоэнергетических электронов (при ускоряющем напряжении 200 кВ) в просвечивающем электронном микроскопе Titan Themis 200, оснащенный корректором сферической аберрации. Электронно-микроскопическое изображение многослойной диэлектрической структуры, полученное в режиме ПРЭМ, приведено на рис. 1.

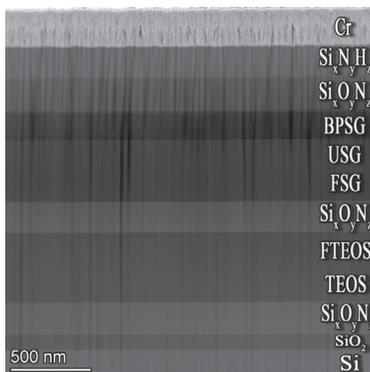


Рис. 1. Состав многослойной диэлектрической структуры

В результате исследования часть диэлектрических слоев была идентифицирована по контрасту между собой на ПРЭМ-изображениях, были изучены границы раздела всех слоев структуры, а также получены и проанализированы данные рентгеновского микроанализа при помощи сопряженного с ПЭМ энергодисперсионного спектрометрического детектора. В рамках работы были косвенным образом подтверждены высокие барьерные свойства оксинитрида кремния $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ и нелегированного силикатного стекла USG. Помимо этого, сделаны выводы об адгезионных свойствах слоев структуры, степени стехиометричности состава слоя нитрида кремния $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$, а также посредством анализа верхней границы раздела неотожженного при высокой температуре слоя борофосфосиликатного стекла BPSG выявлено структурное изменение его приповерхностной области глубиной примерно до 25 нм, что служит доказательством необходимости обязательного применения его отжига в технологических маршрутах изготовления ИС.

Литература

1. Королев М. А., Крупкина Т. Ю., Ревелева М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: в 2 ч. Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование: Учебное пособие / Под общ. ред. Чаплыгина Ю. А. 4-е изд. — М.: Лаборатория знаний, 2020. — 400 с.
2. Киреев Ю. В., Столяров А. А. Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2006. — 192 с.
3. Васильев В. Ю. Методы и возможности in-line контроля тонкопленочных материалов в производстве субмикронных интегральных микросхем: Учебное пособие. — Новосибирск: НГТУ, 2023. — 128 с.



УДК 621.382

Разработка технологии низкотемпературной диффузионной сварки тонких кремниевых чипов и пластин через соединительные слои на основе меди и серебра

Чертов А. В., Калашников С. А., Краснов П. С., Козлов В. А.

АО «ПК «ФИД-Техника»

194223, г. Санкт-Петербург, просп. Тореза., 68, лит. В
s.kalashnikov@fidtech.ru

Рассмотрены особенности технологического процесса и специального технологического оборудования для низкотемпературной диффузионной сварки металлизированных полупроводниковых пластин и приборных чипов в процессах их сборки с использованием соединительных слоев на основе меди и серебра.

Ключевые слова: диффузионная сварка; магнетронное напыление; гальваническое осаждение; сборка; пластины; чипы.

Технология диффузионной сварки (ДС) основана на явлении твердофазного перемешивания и прочного соединения атомов «свариваемых» материалов за счет их взаимной диффузии в местах плотного контакта материалов под воздействием давления и нагрева. ДС не использует плавления соединяемых материалов вблизи плоскости образуемого «сварного» шва. Классическая ДС осуществляется при относительно небольших значениях давления, но при высокой температуре (обычно — не менее половины от температуры плавления соединяемых материалов). Благодаря своим многочисленным достоинствам данная технология широко используется в современном производстве сложных композиционных материалов, изделий для авиационной, космической, электротехнической и электронной промышленности.

В полупроводниковой микроэлектронике технология ДС также нашла свои сферы применения. Наиболее известными из них являются различные комбинации технологии диффузионной и термокомпрессионной сварки для присоединения проволочных и ленточных проводников к кристаллам, а также для сборки и герметизации элементов микросхем. В этих процессах обычно используются варианты сравнительно низкотемпературной сварки с нагревом до температур не выше 250–500 °С, но с приложением давлений до 100 МПа. При этом площадь соединяемых ДС материалов микроэлектроники обычно мала и редко превышает 10–20 мм². В то же время, для применений ДС в других областях полупроводниковой электроники, например — для монтажа кристаллов силовых полупроводниковых приборов (СПП), диффузионная сварка должна обеспечивать возможность проведения прочного соединения материалов на существенно большей площади.

В настоящее время для высоконадежной сборки Si и SiC кристаллов СПП большой площади взамен пайки разработана и используется технология формирования металлических соединительных слоев на основе метода спекания наночастиц металлов Ag, Au или Cu (sintering — в англоязычной литературе). Данный метод по своей сути также является вариантом низкотемпературной ДС и сферы его применений быстро расширяются, однако в России данная технология получила

пока весьма ограниченное применение ввиду отсутствия производства отечественных материалов для этого процесса.

В компании АО «ПК «ФИД-Техника» для сборки кристаллов СПП была разработана собственная оригинальная технология низкотемпературной диффузионной сварки металлизированных полупроводниковых пластин и чипов, не требующая применения материалов на основе наночастиц. Данная технология включает следующие операции: механическую полировку поверхности приборных пластин с использованием алмазных суспензий до достижения шероховатости $R_a < 3$ нм, химическую очистку полированной поверхности, ее металлизацию $\text{Cr}/\text{Ni}/\text{Cu}$ методами магнетронного напыления и гальваническое наращивание пористого слоя Ag толщиной ~ 2 мкм. Диффузионная сварка осуществлялась с применением разработанного ранее для спекания и описанного в работе [1] специального прессового оборудования. Нагрев образцов при ДС производился при температурах $250\text{--}300^\circ\text{C}$ с приложением давлений $10\text{--}50$ МПа в течение времени от 3 до 10 минут. Величина усилия на сдвиг кристаллов при таком способе ДС составляла $30\text{--}50$ МПа. Технология обеспечивала возможность получения толщин сварного шва менее 10 мкм и минимизацию его электрического и теплового сопротивления.

Внедрение данной технологии в опытном производстве позволило осуществлять сборку одновременно до 50 последовательно соединенных в «столбы» кремниевых кристаллов импульсных СПП толщиной ~ 50 мкм и площадью до 2 см^2 в одном процессе. Это обеспечило возможность предельно минимизировать паразитную индуктивность, тепловое и электрическое сопротивление таких сборок в сравнении с любыми другими методами их изготовления.

Литература

1. Оборудование для сборки чипов полупроводниковых приборов методом низкотемпературного спекания наночастиц серебра // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — С. 240–241.



УДК 661.7

Перспективы развития отечественных технологий переработки сырья и получения материалов на основе редких и редкоземельных металлов для микроэлектроники

Лебедева Д. А., Ивановских К. В., Потемкина О. В., Щелконогов М. А.

АО «Гиредмет» им. Н. П. Сажина

111524, г. Москва, ул. Электродная, 2, стр. 1

DaALEbedeva@rosatom.ru

В докладе рассмотрены перспективные направления развития отечественных технологий переработки сырья и получения различных материалов для микроэлектроники на основе редких и редкоземельных металлов.

Ключевые слова: редкие металлы; редкоземельные металлы; металлоорганические соединения; микроэлектроника.

В работе представлен обзор современных подходов к технологиям получения материалов на основе редких и редкоземельных металлов, необходимых для прогресса микроэлектронной индустрии. Особое внимание уделено вопросам синтеза металлоорганических соединений для компонентной базы отечественной микроэлектроники. Рассмотрены перспективные направления развития импортозамещающего производства данных веществ в целях обеспечения предприятий необходимыми прекурсорами для микроэлектроники.

Одной из наиболее актуальных задач в области создания металлоорганических полупроводниковых и других материалов для микроэлектроники является совершенствование методик направленного синтеза высокочистых соединений с заданными свойствами и характеристиками. Важнейшую роль в создании конечных продуктов играет качество исходного сырья.

В настоящее время АО «Гиредмет» является лидером в области разработки технологий получения высокочистых соединений редких и редкоземельных металлов. Разработаны технологии получения более 170 галогенидов более 48 элементов периодической системы для:

- металлургии;
- микроэлектроники;
- волоконной оптики;
- оптоэлектроники;
- ядерной энергетики;
- катализаторов для органического синтеза и синтеза элементоорганических соединений.

При этом используется широкий спектр физико-химических методов отчистки получаемых материалов: направленная кристаллизация, дистилляция, ректификация, зонная плавка. Разработанные методы позволяют получать соединения редких и редкоземельных металлов высокой степени чистоты от 99,9 до 99,999999 % (3N–8N). Очевидно, что высокая чистота этих веществ позволяет использовать их для синтеза координационных соединений на их основе с органическими лигандами.

В докладе рассмотрены перспективные направления развития отечественных технологий переработки сырья и получения различных материалов для микроэлектроники на основе редких и редкоземельных металлов.

УДК 620.3, 621.794.449, 621.3.049.779

Разработка масштабируемой технологии формирования наноразмерных структур на основе волноводов нулевой моды для одномолекулярного секвенатора ДНК

Кугук А. К.¹, Барбашева А. А.¹, Муравьева Л. Н.¹, Коршаков Н. Д.^{1,2},
Алибеков Р. Ш.¹, Шувалова А. С.¹, Баклыков Д. А.^{1,2}, Соловьева А. А.^{1,2},
Рыжков В. В.¹, Родионов И. А.^{1,2}

¹ НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18

² ВНИИА им. Н. Л. Духова

127030, г. Москва, ул. Суцневская, 22

Разработана технология изготовления наноразмерных структур в тонких пленках алюминия методом реактивного ионного травления. Исследованы механизмы деградации тонких пленок в зависимости от методов пред- и пост-обработки образцов, а также предложены способы минимизации коррозионных изменений полученных структур.

Ключевые слова: реактивное ионное травление; волновод нулевой моды; коррозия; реакционная ячейка; одномолекулярное оптическое секвенирование в реальном времени; электронно-лучевое испарение; электронно-лучевая литография; секвенирование.

Секвенирование является одним из ключевых инструментов в развитии генетических технологий. Один из наиболее продвинутых методов секвенирования — одномолекулярное оптическое секвенирование в реальном времени (ООС) в волноводах нулевой моды (ZMW — Zero-Mode Waveguide) — оптических структурах диаметром 100 нм, сформированных в тонких пленках алюминия. ООС подразумевает применение одноразовых ячеек, таким образом, требуется масштабируемая технология их изготовления. Физические принципы работы ООС требуют соблюдения жестких допусков на толщину и сплошность структурированных пленок.

Оптимальным с точки зрения технологичности, масштабируемости и качества структур процессом для формирования ZMW является реактивное ионное травление (РИТ) через органическую маску, формируемую методами электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ).

В ходе работ были оптимизированы следующие технологические операции:

- электронно-лучевое испарение алюминия и предобработка подложек;
- ЭЛЛ;
- РИТ;
- удаление органической маски.

В результате серии экспериментов разработан технологический маршрут изготовления чипов секвенатора, позволяющий вдвое увеличить выход годных образцов и уменьшить дефектообразование как в процессе их изготовления, так и при последующей транспортировке и хранении.

Исследование проводилось в нанотехнологическом центре МГТУ им. Баумана (НОЦ «Функциональные Микро/Наносистемы», ID 74300).



Литература

1. Levene M. J. et al. Zero-mode waveguides for single-molecule analysis at high concentrations // *Science*, 2003. Vol. 299. № 5607. P. 682–686.
2. Lee W. Y., Eldridge J. M., Schwartz G. C. Reactive ion etching induced corrosion of Al and Al-Cu films // *Journal of Applied Physics*, 1981. Vol. 52. № 4. P. 2994–2999.
3. Powell R. A. (ed.). *Dry etching for microelectronics*. Elsevier, 2012.
4. Moreau W. M. *Semiconductor lithography: principles, practice. and materials*. Springer Science & Business Media, 2012.

УДК 621.383.525

PIN-фотодетекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе гетероструктур InGaAs/InAlAs/InP с метаморфными буферными слоями

Баранцев О. В.¹, Василькова Е. И.¹, Пирогов Е. В.¹, Воропаев К. О.², Васильев А. А.², Карачинский Л. Я.¹, Новиков И. И.¹, Соболев М. С.¹

¹ СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

² АО «ОКБ-Планета»

173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1п

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии выращены гетероструктуры 2,2–2,5 мкм PIN-фотодиодов InGaAs/InP с метаморфными буферными слоями InAlAs. Исследованы структурные и электрофизические характеристики кристаллов PIN-фотодиодов.

Ключевые слова: инфракрасные фотодетекторы; молекулярно-пучковая эпитаксия; метаморфные буферные слои.

Фотодетекторы спектрального диапазона 2,2–2,5 мкм имеют широкий спектр применений. Этот диапазон длин волн может использоваться для дистанционного зондирования местности и наблюдения в темное время суток, в приборах пищевой промышленности, сельского хозяйства для анализа газов и органических веществ [1]. Однако для регистрации излучения данной длины волны необходима активная область гетероструктуры из узкозонного полупроводникового материала. Наиболее часто встречающейся в приборах ближнего инфракрасного диапазона является решеточно-согласованная пара материалов In_{0,53}Ga_{0,47}As и InP. Но для достижения необходимой ширины запрещенной зоны молярная доля индия должна быть увеличена до 83%. Для роста слоя In_{0,83}Ga_{0,17}As на поверхности InP во избежание появления в активной области большого количества дислокаций несоответствия необходимо выращивание переходных метаморфных буферных слоев (МБС).

Метаморфные буферные слои осуществляют плавное согласование постоянных решеток в гетероструктуре и способствуют релаксации возникающих при росте упругих напряжений. Одним из способов создания таких слоев является постепенное изменение компонентного состава материала буферного слоя, что равносильно изменению температуры эпитаксиальных источников химических элементов, образующих слой. В рамках данного проекта исследуются гетероструктуры с МБС состава In_xAl_{1-x}As. Для определения оптимальной технологии синтеза данных слоев варьируются параметры их роста: профиль изменения состава, температура роста, длительность и температура термического отжига.

Эффективность использования каждого типа метаморфного буферного слоя оценивается с помощью методов рентгенодифракционного анализа, просвечивающей электронной микроскопии. Анализируются вольт-амперные и вольт-фарядные характеристики кристаллов PIN-фотодиодов, изготовленных методом взрывной фотолитографии. Важной характеристикой фотодетекторов является темновой ток — ток, протекающий в приборе при отсутствии внешнего излучения [3]. Одной из ключевых функций метаморфных буферных слоев является



значительное снижение величины темнового тока. На данный момент получены образцы, в которых значение темнового тока составляет 10^{-5} А при напряжении смещения -1 В, а плотность дислокаций в поглощающем слое достигает $\sim 5 \cdot 10^8$ см $^{-2}$.

Литература

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. Детекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе InGaAs (обзор) // Успехи прикладной физики, 2014. — Т. 2. — № 2.
2. Li Ping, Li Tao, Deng Shuangyan, Li Xue, Shao Xiumei, Tang Hengjing, Gong Haimei, Dark current analysis of mesa type In $_{0.83}$ Ga $_{0.17}$ As p-i-n photodiodes with different annealing treatment, Infrared and Laser Engineering, 2016. Vol. 45. № 5.

УДК 621.3.049.75

Разработка и анализ методики для создания токопроводящих структур на поверхности пластиков путем лазерного структурирования

Сафонов Т. С., к. т. н. Рябков Е. Д.*МИРЭА — Российский технологический университет**119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78**timsafonov@yandex.ru*

В данной работе были исследованы и разработаны новые аддитивные методики производства токопроводящих элементов на пластиковых подложках на основе методов лазерного структурирования и химического меднения без применения дорогостоящих химических компонентов и драгоценных металлов.

Ключевые слова: токопроводящие элементы; пластиковые подложки; лазерное структурирование; химическое меднение.

В настоящее время наблюдается огромный рост интереса к разработке, созданию и производству устройств на основе гибкой электроники. Одним из ключевых технологических элементов гибкой электроники является технология сборки электронных схем путем установки ее элементов на гибкую пластиковую подложку, на которую предварительно должны быть нанесены токопроводящие структуры. Важными применениями гибкой электроники являются создание носимых сенсорных систем для человеческого тела [1], развитие технологий отслеживания на основе гибких датчиков радиочастотной идентификации (RFID — Radiofrequency Identification) на гибкой пластиковой основе [2] и производство интегрированных трехмерных электронных систем, в которых происходит совмещение корпуса устройства и основания для электронной схемы [3].

На данном этапе развития гибкой электроники технологиям производства токопроводящих структур на пластике необходимо преодолеть следующие проблемы:

- неаддитивность, то есть ограниченность и негибкость технологий с фиксированным шаблоном печати;
- сложности масштабирования, то есть невозможность быстрого перехода от штучного производства к масштабному выпуску систем и наоборот;
- высокая стоимость производства электроники на гибком пластике из-за использования дорогого допированного пластика, растворов с драгметаллами или сложных в использовании и дорогих лазеров.

В ходе выполнения данной работы был предложен новый аддитивный метод нанесения меди на пластиковые поверхности, который по сравнению с существующими методами не требует использования фиксированного шаблона, а также использования специальных композитных материалов или соединений драгоценных металлов. Кроме того, отдельно стоит отметить быструю и масштабируемость созданного процесса: скорость сканирования лазерным пучком поверхности диэлектрика достигает десятков сантиметров в секунду, а последующая стадия



химического меднения позволяет последовательно увеличивать количество получаемого материала в единицу времени без использования дорогостоящего оборудования.

Разработанная методика включает в себя три этапа:

- на поверхность пластика наносится раствор поверхностного активатора, который был создан на основе доступной фосфорномолибденовой кислоты;
- образец подвергается лазерному структурированию с использованием установки со специально созданной лазерной головкой на основе ультрафиолетового лазерного диода;
- химическое меднение активированной области с помощью реакции восстановления ионов меди с формальдегидом.

Большой интерес представляет анализ граничной области между медью и пластиком для изучения состава каталитических структур и объяснения механизма их взаимодействия с раствором химического меднения. По результатам элементного анализа с использованием электронной микроскопии было обнаружено, что при лазерном структурировании нанесенного активатора образуется монокарбид молибдена, который обладает металлической проводимостью и способностью адсорбировать водород, что является ключевым в процессе химического меднения на поверхности пластика. Также были изучены области достаточно глубокого залегания меди, образованной после химического меднения, что позволило хорошо увидеть граничную область между медью, пластиком и модифицированной поверхностью с монокарбидом молибдена. Также с помощью измерения электрического сопротивления было показано, что полученные медные структуры обладают высокой электрической проводимостью и могут быть использованы при создании электронных устройств с высокой плотностью монтажа.

Литература

1. Khairullina E. M. et al. Laser-assisted surface activation for the fabrication of flexible non- enzymatic Cu-based sensors // *Microchimica Acta*, 2022. 189, 259.
2. Finkenzyler K., Muller D. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*, Wiley Telecom, 2010.
3. Франке Й. *3D MID. Материалы, технологии, свойства* / Пер. под ред. И. А. Волкова. — СПб: Профессия, 2014.

УДК 621.3

Исследование процессов фокусирования и осаждения наночастиц через электростатическую матричную линзу

Масленников Д. В., Патарашвили А. Н., Ефимов А. А., к. т. н.

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9*

В работе исследованы процессы фокусирования и осаждения наночастиц через электростатическую матричную линзу при варьировании формы и размера отверстий в линзе, значений размера и заряда аэрозольных наночастиц и плотности поверхностного заряда линзы, а также времени осаждения наночастиц.

Ключевые слова: наночастицы; электростатическая матричная линза; генератор искрового разряда; сухая аэрозольная печать.

Технология сухой аэрозольной печати с применением электростатической фокусировки аэрозольных наночастиц является новым и перспективным направлением для исследований. Развитие и использование данной технологии позволяет сократить стоимость и время разработки электронных устройств на 1–2 порядка по сравнению с кремниевой электроникой, в основе которой лежит использование многостадийных литографических процессов. К тому же с применением технологии сухой аэрозольной печати возникает возможность создания принципиально новых изделий и материалов, в числе которых гибкие СВЧ-антенны, газовые сенсоры, SERS-активные материалы [1], а также различные функциональные покрытия.

На размеры и токопроводящие свойства формируемых структур влияют такие параметры системы, как напряженность поля вблизи подложки при отсутствии электростатической линзы; поверхностный заряд, возникающий на линзе в результате осаждения ионов или приложения напряжения; расстояние между линзой и подложкой; размер отверстий в линзе. Помимо этого, значительное влияние оказывают свойства самих наночастиц: их размер, форма, величина заряда, скорость движения и концентрация. В целях исследования влияния параметров системы на характеристики формируемой структуры проведено три серии экспериментов по осаждению заряженных аэрозольных наночастиц на кремниевую подложку с использованием различных электростатических линз.

Первая серия экспериментов проведена с использованием линзы, произведенной с применением технологии оптической литографии; варьировались такие параметры системы, как размер, форма и количество фокусирующих отверстий линзы. В качестве диэлектрической основы линзы использовался фоторезист SPR220-7.0 (Microresist Technology GmbH, Германия) толщиной 9,6 мкм, наносимый методом центрифугирования. В слое фоторезиста выполнялись отверстия прямоугольной и круглой формы с характерными размерами от 1 до 16 мкм.

В качестве электростатической линзы во второй серии экспериментов использовался пластиковый диэлектрический трафарет с шириной отверстия 120 мкм и толщиной 400 мкм. Использование данного типа линзы позволило провести исследование влияния различных дефектов отверстия в линзе и времени осаждения наночастиц на геометрические параметры формируемой структуры.



Заключительная серия экспериментов с использованием проводящей матричной линзы проведена в целях изучения влияния величины плотности поверхностного заряда линзы, а также значений размера и заряда наночастиц на параметры структуры. Линза представляла собой металлическую пластину толщиной 120 мкм с матрицей 35×33 из круглых отверстий размером 280 мкм и расстоянием между центрами 390 мкм. Использование проводящей линзы позволило изменять плотность поверхностного заряда на линзе путем варьирования подводимого к линзе напряжения при условии, что подложка заземлена. С увеличением разности потенциалов между подложкой и линзой удалось сформировать структуру с минимальным размером 14 мкм при ширине отверстия 280 мкм, что демонстрирует высокую эффективность процесса фокусировки наночастиц с использованием проводящей матричной линзы (рис. 1).

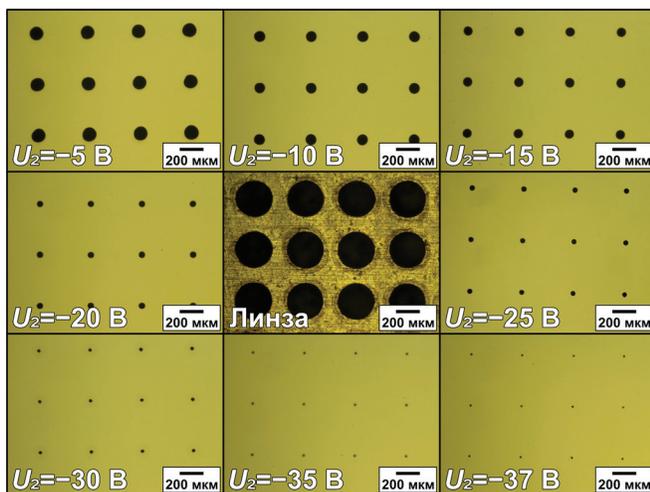


Рис. 1. Фотографии структур, напечатанных через проводящую матричную линзу при варьировании потенциала на линзе U_2

Для проведения экспериментов разработан и изготовлен испытательный стенд, состоящий из источника наночастиц, зарядного устройства для униполярной зарядки наночастиц [2] и герметичной камеры для печати наночастицами. Данный стенд обеспечивает возможность в широком диапазоне изменять ряд основных параметров наночастиц: концентрацию, размер, форму, скорость, элементный состав и значение электрического заряда. Изготовлена простая и удобная в эксплуатации камера для печати с параллельной подачей аэрозоля (рис. 2), обеспечивающая высокую эффективность фокусировки, а также универсально подходящая для всех типов линз.



УДК 621.315.592

Технологические особенности формирования эпитаксиальных структур кремния для высокоэффективных СВЧ-диодов

Дубкова А. С.^{1,2}¹ АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

Dubkova.a.s@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе рассмотрены технологические приемы, позволяющие методом эпитаксии кремния из газовой фазы при пониженной температуре получать структуры с толщиной активных областей менее 0,1 мкм и значительным уровнем легирования в диапазоне от 10^{13} до 10^{19} см⁻³.

Ключевые слова: кремний; газофазная эпитаксия; СВЧ-диоды; ЛПД.

Кремниевые СВЧ-диоды, работающие в мм-диапазоне длин волн, предъявляют строгие требования к многослойным эпитаксиальным структурам, на которых они создаются. Тонкие слои должны различаться не только уровнем легирования, но и типом проводимости. Поскольку СВЧ-диоды работают в жестких режимах, слои также должны быть бездефектными.

Решение поставленной задачи осуществляется путем применения низкотемпературного процесса газофазной эпитаксии при пониженном давлении в реакторе с использованием пиролиза моносилана. Осаждение при пониженном давлении улучшает качество растущих кристаллических слоев и позволяет снизить температуру эпитаксии. При температурах роста слоя ниже 1000 °С значительное влияние на профиль распределения примеси по толщине эпитаксиального слоя оказывает эффект поверхностной сегрегации примеси. С учетом наличия сегрегации примеси варьировались режимы предварительного запуска легирующей добавки — диборана и арсина в реактор (в целях насыщения приповерхностного слоя), роста и отжига после роста (для уменьшения влияния на наращивание последующих слоев) [1, 2].

Было обнаружено, что уровень легирования p -слоев, граничащих с p^+ -слоем, почти не зависит от уровня легирования подложки p^{++} ($4 \cdot 10^{19}$ – $1,5 \cdot 10^{20}$ см⁻³), но зависит от температуры наращивания и чем выше температура, тем выше уровень. Это совпадает с написанным ранее в работе [3]: автолегирование бором уменьшается при понижении температуры осаждения слоя, а автолегирование мышьяком — увеличивается. Также было замечено, что профиль легирования переходных областей p^+ -слоя зависит не только от режима наращивания слоя, но и от режимов предварительного запуска легатуры в реактор и отжига слоя. И есть отличия при легировании слоев бором и мышьяком или фосфором. Использование мышьяка в качестве легирующей примеси позволяет получать слои с высоким уровнем легирования более тонкими.

Для получения эпитаксиальной структуры кремниевого лавинно-пролетного диода $p^{++}pp^+pnn^+nn^{++}$ -типа были проведены исследования по подбору технологических параметров роста высоколегированных слоев, различающихся типом проводимости. В работе удалось получить тонкие слои с концентрацией примеси бора

и мышьяка в p^+ - и в n^+ -слоях — $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что выше, чем ранее полученные значения [4]. Толщина высоколегированных слоев составляет 0,09 мкм.

Для изготовления кремниевых СВЧ-диодов с улучшенными характеристиками, большей мощностью и расширенным в сторону высоких частот рабочим диапазоном необходимы эпитаксиальные структуры с тонкими (0,1 мкм и менее) n - и p -слоями. Получение таких структур возможно газофазной эпитаксией при пониженном давлении 10–20 кПа и температуре 850–950 °С в реакторе путем пиролиза моносилана. При этом необходимо учитывать влияние эффекта сегрегации примесей в приповерхностных слоях во время наращивания. Закономерности легирования n - и p -слоев различаются. В зависимости от приборных задач получение тонких слоев требует технологической оптимизации всех этапов наращивания. Исследования поверхностной сегрегации примеси бора и мышьяка при оптимизации режимов наращивания тонких слоев кремния будут продолжены.

Литература

1. Величко О. И. Явление сегрегации примесных атомов в области залегания p - n -перехода // Доклады БГУИР, 2016. — № 6 (100). — С. 30–34.
2. Шенгуров В. Г., Чалков В. Ю., Шенгуров Д. В., Денисов С. А. Выращивание методом молекулярно-лучевой эпитаксии кремниевых слоев n -типа проводимости на сильнолегированных бором подложках // Физика и техника полупроводников, 2009. — Т. 43. — № 2. — С. 193–196.
3. Chung Keith H. Silicon-based epitaxy by chemical vapor deposition using novel precursor neopentasilane: dissertation candidacy for the degree of doctor of philosophy. Princeton, 2010. 149 p.
4. Дубкова А. С., Рябов В. Н., Тарасов И. В., Хахин Н. Б. Эпитаксиальные структуры кремния для СВЧ-приборов // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2022. — № 2 (553). — С. 58–63.



УДК 535.33

Исследование свойств пленок из наночастиц алюминия, полученных методом сухой аэрозольной печати

Санатулина А. Ф., Новоселов А. К., Мало Д., Лизунова А. А.

Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследованы оптические свойства тонких пленок на основе наночастиц алюминия, полученных методом сухой аэрозольной печати на подложках из чистого кварцевого стекла и на пленках из полупроводниковых нанокристаллов ZnO. Получены пленки из наночастиц алюминия с различной оптической плотностью.

Ключевые слова: наночастицы алюминия; сухая аэрозольная печать; оптическая плотность.

В последние годы был предложен новый подход к аэрозольной печати, который не требует использования жидких чернил и основан на использовании газоразрядного генератора аэрозолей в качестве источника наночастиц [1]. В ходе работы был проведен синтез наночастиц алюминия с использованием газового разряда при таких условиях: поток газа 90 мл/мин; напряжение 1,5 кВ; конденсатор 107 нФ, с дальнейшей аэрозольной печатью при различных параметрах на подложках из чистых кварцевых стекол и пленках из полупроводниковых нанокристаллов ZnO различных оптических плотностей.

На спектрофотометре JASCO V-770 определены спектры поглощения пленок алюминия (рис. 1а), полученные при различных параметрах печати: скорости движения подложки и отступа между линиями пленки. Было обнаружено, что при увеличении скорости в два раза с 500 до 1000 мкм/с при постоянном отступе между линиями 100 и 50 мкм оптическая плотность полученных пленок на длине волны 300 нм увеличивается с 0,06 до 0,11 и с 0,08 до 0,16 соответственно. Можно предположить, что увеличение оптической плотности пленок происходит из-за сдувания аэрозолем уже нанесенных наночастиц, так как при скорости 500 мкм/с аэрозоль дольше пребывает в определенном месте, чем при скорости 1000 мкм/с. А при уменьшении отступа между линиями в два раза с 100 до 50 мкм при постоянной скорости 500 и 1000 мкм/с оптическая плотность полученных пленок на длине волны 300 нм увеличивается с 0,06 до 0,08 и с 0,11 до 0,16 соответственно. Увеличение оптической плотности пленок происходит из-за пересечения наносимых линий при уменьшении отступа между этими линиями.

Во втором варианте экспериментов наночастицы алюминия наносились на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO различных плотностей (рис. 1б) для исследования эффекта плазмонного усиления фотолюминесценции ZnO в присутствии наночастиц алюминия. Использовались следующие параметры печати наночастиц алюминия на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO: скорость 1500 мкм/с и отступ между линиями 100 мкм. Так, пленки из наночастиц алюминия, наносимые на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO следующих оптических плотностей на длине волны 300 нм: 0,04; 0,06; 0,07; 0,20, имеют соответствующие оптические плотности после вычитания оптических

плотностей пленок из полупроводниковых нанокристаллов ZnO: 0,68; 0,72; 1,44; 1,07. При этом пленка из наночастиц алюминия при таких параметрах имела оптическую плотность, равную 0,10 на длине волны 300 нм. Таким образом, выявлено, что оптическая плотность пленки из наночастиц алюминия при нанесении на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO значительно больше, чем при нанесении такой же пленки на чистое кварцевое стекло.

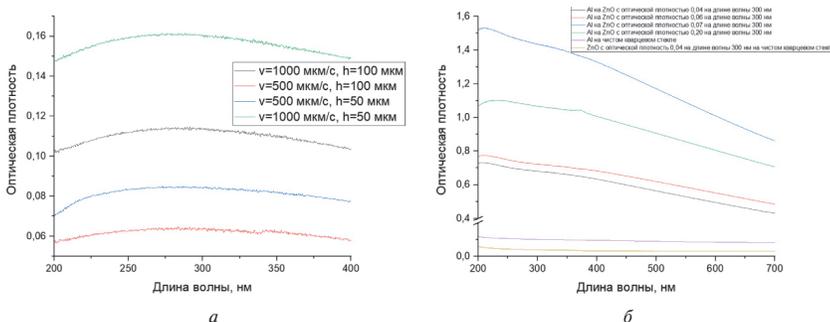


Рис. 1. Спектры поглощения: *а)* пленок из наночастиц алюминия, полученных при различных параметрах печати на чистых кварцевых стеклах; *б)* пленок из наночастиц алюминия, нанесенных на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO с различными плотностями

Таким образом, методом сухой аэрозольной печати были получены пленки из наночастиц алюминия при различных параметрах печати на подложках из чистого кварцевого стекла и на пленках из полупроводниковых нанокристаллов ZnO различных оптических плотностей. Были изучены свойства таких пленок и выявлено, что оптическая плотность пленки увеличивается при увеличении скорости движения подложки с 500 до 1000 мкм/с и увеличивается при росте отступа между линиями с 100 до 50 мкм. Было выявлено, что пленки из наночастиц алюминия имеют большую оптическую плотность при нанесении на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO, чем при нанесении на чистое кварцевое стекло.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00311.

Литература

1. Efimov A. A. et al. Investigation of sintering of silver lines on a heated plastic substrate in the dry aerosol jet printing // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. Vol. 1124. № 8. P. 081041.



УДК 621.382

Исследование метода синтеза оксида графена для приложений силовой электроники

Кузнецова В. В., Спиридонов С. В., Морозов М. В., Дробышев С. В.

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А. Н. Туполева — КАИ

420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10

smailshka1998@mail.ru

В работе рассмотрена возможность использования оксида графена в качестве активного вещества суперконденсатора. Проведен анализ существующих методов синтеза порошковых материалов на основе оксида графена. В результате апробации синтеза получены тестовые образцы, исследованы их ключевые морфологические и структурные свойства.

Ключевые слова: конденсаторы; суперконденсаторы; оксид графена; материалы электроники.

Стремление к миниатюризации электронных компонентов приводит к необходимости поиска новых материалов и технологических подходов. В области силовой электроники перспективным направлением работ является улучшение активного вещества электродов конденсаторов и суперконденсаторов. Уменьшение размеров достигается за счет применения материалов с большими показателями удельной емкости, что требует сочетания особых электрохимических свойств и высокой удельной площади поверхности. В настоящее время рассматривается возможность использование материалов на основе графена, таких как оксид графена (ОГ) и восстановленный оксид графена (ВОГ) [1, 2]. Благодаря расслоению атомарных слоев наблюдается развитая поверхность и высокая способность к захвату и удержанию заряда. Низкое сопротивление обеспечивает хорошие показатели рабочих токов.

В ряде публикаций [3, 4, 5] продемонстрированы прототипы конденсаторов на основе ОГ и ВОГ. Заявляются показатели емкости до 1045 Ф/г, плотности энергии до 15 Вт/кг и плотности мощности до 4 кВт/кг. Наибольшей сложностью при разработке таких конденсаторов является проработка получения чистых материалов с заданной морфологией и составом. В представленной работе рассмотрен синтез оксида графена модифицированным методом Хаммера [6]. Несмотря на хорошую известность, существующие модификации позволяют получать структуры со значительно различным качеством [7]. В ходе апробации собственного подхода проведена характеристизация свойств синтезированных образцов. Подтверждено наличие развитой поверхности с выраженным расслоением графеновых структур. Стехиометрическое соотношение элементов и структурный анализ свидетельствуют о низком содержании примесей и посторонних фаз.

Литература

1. Raza W., Ali F., Raza N., Luo Y., Kim K. H. et al. Recent advancements in supercapacitor technology // *Nano Energy*, 2018. Vol. 52. P. 441–473.
2. Gautham Prasad G., Shetty N., Thakur S., Rakshitha, Bommegowda K. B. Supercapacitor technology and its applications: a review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 561. № 1. P. 012105.

3. Liu X., Shang P., Zhang Y., Wang X., Fan Z. et al. Three-dimensional and stable polyaniline-grafted graphene hybrid materials for supercapacitor electrodes // *Journal of Materials Chemistry A*, 2014. Vol. 2. № 37. P. 15273–15278.
4. Jana M., Khanra P., Murmu N. C., Samanta P., Lee J. H. et al. Covalent surface modification of chemically derived graphene and its application as supercapacitor electrode material // *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014. Vol. 16. № 16. P. 7618–7626.
5. Tseng L. H., Li W. C., Wen T. C. The effectiveness of graphene oxide added in activated carbon for superior supercapacitor performance // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2023. Vol. 143. P. 104684.
6. Selvakumar D., Sivaram H., Alsalmeh A., Alghamdi A., Jayavel R. Facile synthesis of free standing highly conducting flexible reduced graphene oxide paper // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016. Vol. 27. P. 6232–6241.
7. Park S., An J., Potts J. R., Velamakanni A., Murali S. et al. Hydrazine-reduction of graphite-and graphene oxide // *Carbon*, 2011. Vol. 49. № 9. P. 3019–3023.



УДК 621.3.049

Технология изготовления магнитных Холл-структур на поверхности чешуек графита

Силина С. К.¹, Турпак А. А.¹, Шишелов А. Ф.¹, к. ф.-м. н., Давыденко А. В.¹, к. ф.-м. н., Куркина И. И.²

¹ ДВФУ, Лаборатория пленочных технологий
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
silina.sk@dyfu.ru

² СВФУ, лаборатория «Графеновые технологии»
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58

В данной работе была отработана технология нанесения Холл-структур на микроскопические чешуйки графена и графита методом проекционной фотолитографии и плазменного травления. Полученные структуры были исследованы на наличие эффекта передачи углового момента от кристаллической решетки в магнитный слой с помощью электронов проводимости (Spin-orbit torque или SOT-эффект).

Ключевые слова: SOT-эффект; Холл-структуры; фотолитография.

SOT-эффект определяется спин-орбитальным взаимодействием — связью между спиновым и орбитальным движением электрона в атоме. Когда электрон движется вокруг ядра атома, его орбитальное движение создает магнитное поле. Это магнитное поле взаимодействует со спином электрона, вызывая изменение энергии его спиновой ориентации. Данный эффект оказывает большое влияние на магнито-транспортные свойства наносистем. С помощью спин-орбитального взаимодействия можно преобразовать зарядовый ток в спиновый и, таким образом, управлять намагниченностью систем посредством пропускания вдоль них зарядового тока. Такой способ управления ориентацией намагниченности является перспективным для создания устройств энергонезависимой магнитной оперативной памяти (MRAM), гибридных устройств «логика-в-памяти» (logic-in-memory) и нейроморфных вычислителей [1]. SOT-эффект позволяет перемагничивать среды с перпендикулярной и комбинированной анизотропиями. Эти преимущества делают SOT-эффект привлекательным для приложений как со стороны исследователей, так и индустрии.

Первоначально SOT-устройства состояли из трехслойных структур, в которых между слоями тяжелого металла и диэлектрика был расположен слой ферромагнетика. На сегодняшний момент известно о большом количестве SOT-устройств на основе различных классов материалов. Для изготовления энергонезависимой магнитной памяти интересны такие материалы, как топологические изоляторы, Ван-дер-Ваальсовские материалы, дихалькогениды переходных металлов, а также интересен графен в сочетании с вышеперечисленными материалами [2].

Методы подготовки тонких двумерных материалов включают в себя механическое отслаивание, химическое осаждение и магнетронное распыление. В настоящий момент механическое отслаивание является одним из основных способов получения атомарно тонких чешуек двумерных материалов, пригодных для исследования SOT-эффекта из-за сохранения высокого качества их кристаллической

структуры. Одним из первых материалов, который получали механическим отслаиванием от объемного материала, был графен и тонкие слои графита [3].

Главной целью данной работы является отработка полного технологического цикла напыления функциональной пленки на поверхность двумерной чешуйки и изготовление из нее Холл-структуры. В данный технологический цикл входит напыление слоев Pt(40 Å)/Co(7 Å)/Pt(30 Å) на установке магнетронного напыления на поверхность чешуек, создание Холл-структур с помощью проекционной фотолитографии и ионно-плазменного травления, изучение качества структур с помощью сканирующего электронного микроскопа и анализ магнитных свойств образцов с помощью Керр-микроскопии. Помимо установок, примененных для отработки технологического цикла, были использованы и другие установки для контроля процесса изготовления Холл-структур, например атомно-силовая микроскопия.

На первом этапе были отработаны параметры экспозиции проекционной фотолитографии, при которых достигалась максимальная резкость засвеченной области в фоторезисте. При этом пленка фоторезиста засвечивалась полностью по всей толщине. На втором этапе на подложку оксидированного кремния с чешуйками графита была осаждена магнитная пленка Pt/Co/Pt. Пленка, осажденная на поверхность чешуйки, демонстрировала перпендикулярную магнитную анизотропию. На третьем этапе из пленки на чешуйке графита была сформирована Холл-структура. Магнитные свойства Холл-структуры сравнивались с магнитными свойствами неструктурированной пленки на графите.

В результате была отработана технология изготовления Холл-структур из пленок, выращенных на поверхности чешуек графита. Данная технология будет использована при работе с чешуйками любых перспективных двумерных материалов, в том числе для измерения аномального Холл-эффекта и величины SOT-эффекта в исследуемых структурах.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-00065.

Литература

1. Огнев А. В. Управление спин-орбитальным крутящим моментом и перемагничиванием в магнитных гетероструктурах на основе топологических материалов и их приложение.
2. Ткачев С. В., Буслаева Е. Ю., Губин С. П. Графен — новый углеродный наноматериал // Неорганические материалы, 2011. — Т. 47. — № 1. — С. 5–14.
3. Novoselov K. S. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films // Science, 2004. Vol. 306. № 5696. P. 666–669.



УДК 621.382.233

Изготовление высоковольтного диода с использованием кремниевых структур со сквозными каналами p -типа

Царева Е. А.¹, Скиданов А. А.¹, Коновалов А. В.¹, Веневцев С. М.¹,
Середин Б. М.², д. т. н.

¹ АО «ВЗПП-МИКРОН»

394033, г. Воронеж, Ленинский просп., 119А

² ЮРГПУ им. М. И. Платова

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Разработана технология изготовления диода с использованием кремниевых структур со сквозными каналами p -типа (КССК). Следующим этапом является усовершенствование технологии для изготовления высоковольтного прибора. Для этого была разработана топология нового устройства, рассчитана система охранных колец, проработан производственный маршрут.

Ключевые слова: термомиграция; кремниевые структуры со сквозными каналами; диод.

Основным процессом создания сквозных каналов p -типа является термомиграция (перекристаллизация алюминия сквозь толщину кремниевой пластины), которая позволяет создавать изолированные кремниевые структуры произвольной формы. На основе данных структур был разработан диод обратной полярности.

Такой прибор позволит упростить технологию сборки силовых модулей, повысит тепловую, динамическую стабильность параметров и общую надежность изделия при лучших технико-экономических показателях в сравнении с технологией аналогичных приборов, изготовленных по технологии с защитной фаской или плавающими охранными кольцами.

В настоящее время на предприятии ведется работа по освоению конструкции диода с обратной полярностью расположения анодного и катодного вывода, изготавливаемого с использованием пластин со сквозными каналами p -типа. Были получены образцы диодов с пробивными напряжениями 260–270 В, что соответствует уровню напряжения пробоя плоского p - n -перехода для используемой марки кремния. Таким образом, полученные результаты позволяют приступить к разработке высоковольтного диода на основе кремниевой структуры со сквозными каналами p -типа. Для этого была разработана новая топология, рассчитана система охранных колец в САПР Silvaco TCAD и проработан производственный маршрут.

Разработка и освоение данной конструкции проводились на предприятии АО «ВЗПП-Микрон» совместно с ЮРГПУ имени М. И. Платова.

УДК 538.97

Влияние параметров импульсного лазерного излучения на процессы модификации наночастиц металлов в аэрозольном потоке

Ворошилова В. А., Корнюшин Д. В., Борисов В. И., Долгов В. А.,
Иванов М. С., Иванов В. В.

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследована эффективность спекания импульсным лазерным излучением агломератов размером 200 нм аэрозольных наночастиц золота в потоке инертного газа, синтезированных в импульсном газовом разряде, до квазисферических наночастиц размером 115 нм в зависимости от параметров лазерного излучения.

Ключевые слова: сферические наночастицы; агломераты наночастиц; лазерное спекание; эффективность спекания; аэрозольная печать.

В ряде технологических машин микроэлектроники, используемых для нанесения металлических слоев и плазменных наноструктур, перенос металла осуществляется в форме наночастиц (НЧ), которым свойственно объединяться в агломераты в процессе перемещения в аэрозольном потоке. Осаждение агломератов на подложку может приводить к появлению нежелательной пористости формируемого слоя. Спекание агломератов (модификация) позволяет формировать НЧ квазисферической формы контролируемого размера, что необходимо для их плотной укладки в целях получения наибольшей проводимости элементов микроэлектроники и для формирования плазменных наноструктур.

В данной работе исследована модификация импульсным лазерным излучением агломератов аэрозольных НЧ золота в потоке инертного газа, синтезированных в импульсном газовом разряде (рис. 1). В качестве источников лазерного излучения были выбраны два лазера: CNI AO-S-1064 и лазер-компакт Tech-1053 с длинами волн 1064 и 1053 нм соответственно. Модификация агломератов НЧ производилась в ячейке лазерной модификации с длиной рабочего канала 180 мм и диаметром 3 мм. Средний размер первичных агломератов и модифицированных НЧ исследовался с использованием анализатора дифференциальной электрической подвижности TSI SMPS 3936.



Рис. 1. Схематическое изображение процесса модификации агломератов лазерным излучением

Согласно теоретической оценке, расчетное время остывания сферической НЧ золота диаметром 50 нм в воздухе составляет около 1 мкс [1, 2]. Энергия импульса лазерного излучения, воздействующего на первичные агломераты НЧ, затрачивается на их модификацию и теплоотдачу в окружающий газ. Использование

лазерного излучения с высокой частотой следования импульсов (>1000 Гц) является нецелесообразным по причине нагрева транспортного газа в рабочем канале ячейки лазерной модификации, которое приводит к повторной агломерации модифицированных НЧ. Таким образом, в проведенных исследованиях НЧ золота в ячейке лазерной модификации не накапливают энергию между лазерными импульсами, так как период следования импульсов составляет не менее 1 мс.

На рис. 2 представлен график зависимости среднего размера НЧ в потоке от плотности энергии излучения и частоты следования импульсов для CNI-1064 и Tech 1053. Основываясь на результатах, можно сделать вывод, что существует минимальная энергия единичного импульса, необходимая для процесса модификации агломератов НЧ. Кроме того, в целях минимизации потерь энергии на процессы теплопередачи и нагрева транспортного газа требуется лазерное излучение с меньшей длительностью и количеством импульсов излучения.

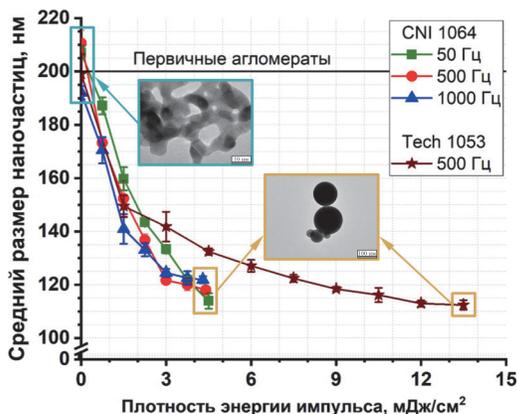


Рис. 2. График зависимости среднего размера наночастиц от плотности энергии излучения источников излучения CNI 1064 и Tech 1053 и вставки ПЭМ-снимков агломератов и модифицированных НЧ

По результатам исследований установлено, что с уменьшением длительности импульса лазерного излучения с 15 до 5 нс, используемого в процессах модификации НЧ, понижается пороговое значение плотности энергии импульса с 13,5 до 4,5 мДж/см², необходимое для модификации агломератов НЧ в уединенные квайсферические наночастицы.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание) № 075-03-2024-117, номер проекта FSMG-2024-0009.

Литература

1. Evans P. Surface Plasmon Enhanced Heating of Gold Nanoparticles: A Plasmonic Optical Switch. Doctoral Dissertations, 2007.
2. Xi Q., Li Y., Zhou J., Li B., Liu J. Role of Radiation in Heat Transfer from Nanoparticles to Gas Media in Photothermal Measurements // Int. J. Mod. Phys. C, 2019. 30, 1950024. DOI: 10.1142/S0129183119500244.

УДК 666.1.056.2

Разработка и оптимизация метода сенсibilизации и дальнейшей металлизации полимерных изделий, полученных с использованием аддитивных технологий

Карзакова В. С., Тюрина С. А., к. т. н., Демин В. Л., к. т. н.

*МИРЭА — Российский технологический университет**119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78*

Проведен анализ тенденций развития в области металлизации 3D печатных полимерных изделий в целях получения металлического покрытия. Проведены опыты по получению таких покрытий на напечатанных образцах.

Ключевые слова: химическое осаждение металлов; металлические покрытия; 3D-печать; материалы для 3D-печати.

На сегодняшний день 3D-печать полимерными материалами является наиболее широкоприменяемой технологией аддитивного производства. Благодаря относительной дешевизне материалов и отсутствию необходимости применения оснастки в производстве штучных изделий можно быстро производить изделия совершенно разной формы. Однако зачастую свойства получаемых изделий не могут удовлетворять предъявляемым требованиям.

Чтобы придать изделиям повышенную устойчивость к свету, истиранию и задать им специальные свойства, могут применяться композиционные материалы или наноситься защитные и функциональные покрытия.

Такой подход применим при изготовлении проточных химических реакторов, деталей микророботов и других изделий, значительно снижая производственные затраты [1, 2].

Согласно обзорной статье, в период с 2012 по 2022 гг. в базе данных SCOPUS было опубликовано около 20 500 документов, касающихся металлических покрытий. В настоящее время направление металлизации полимеров вновь приобрело актуальность [3].

Отчасти это может быть связано с появлением нового подхода, применимого в 3D-печати. Вместо последовательного нанесения слоев сенсibilизатора и активатора в случае химического осаждения или нанесения проводящего слоя + металлизации в гальванической ванне, как в случае электрохимического процесса, было предложено модифицировать печатный материал в целях придания им восстановительной способности.

Это решение может сократить временные затраты при производстве, а также повысить гибкость процесса при печати модифицированным материалом поверх обычного за счет исключения целых этапов и необходимости использования оснастки при селективной печати. В некоторых случаях технология предусматривает получение покрытий из разных металлов [4].

Во время нашего исследования мы сосредоточены на достижении следующих целей:

- выбор соединения для модификации печатного материала;
- получение опытных образцов покрытия на модифицированном материале;



- изучение свойств модифицированного материала, его способность к хранению;
- изучение процессов, протекающих на каждом этапе получения покрытия;
- выбор качественных и количественных методов оценки свойств получаемых покрытий.

Литература

1. Kucherov F. A., Romashov L. V., Ananikov V. P. Development of 3D+G printing for the design of customizable flow reactors // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 430. Part 1. Article ID 132670. ISSN 1385-8947. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132670.
2. Perera A. T. K., Wu K., Wan W. Y., Song K., Meng X., Umezu S., Wang Y., Sato H. Modified polymer 3D printing enables the formation of functionalized micro-metallic architectures // *Additive Manufacturing*, 2023. Vol. 61. Article ID 103317. ISSN 2214-8604. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103317.
3. Muraliraja R., Anthoni Sagaya Selvan R., Selvakumar A., Franco M., Tamilarasan T. R., Sanjith U., Wei Sha, Jothi Sudagar. A review of electroless coatings on non-metals: Bath conditions, properties and applications // *Journal of Alloys and Compounds*, 2023. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.170723.
4. Xiao J., Zhang D., Zheng M., Bai Y., Sun Y., Zhang L., Guo Q., Yang J. 3D printing of metallic structures using dopamine-integrated photopolymer // *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. Vol. 19. P. 1355–1366. ISSN 2238-7854. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.009.

УДК 67.02

Разработка технологии изготовления воздушных мостов для сверхпроводниковых интегральных схем

Телеганов М. И.¹, Смирнов Н. С.^{1,2}, Коршаков Н. Д.^{1,2}, к. т. н., Родионов И. А.^{1,2}¹ НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана

105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18

² ВНИИА им. Н. Л. Духова

127030, г. Москва, ул. Суцеская, 22

Разработана технология изготовления воздушных мостов для сверхпроводниковых интегральных схем. Добавление мостов на схему позволяет реализовать пересечения сигнальных линий и избавиться от паразитных мод. Приводится характеристика сверхпроводящих свойств мостов и диапазон оптимальных размеров.

Ключевые слова: сверхпроводниковые воздушные мосты; СВЧ-электроника; сверхпроводниковые интегральные схемы.

Сверхпроводниковые копланарные волноводы и резонаторы на их основе широко применяются в сверхпроводящих системах: квантовых вычислительных схемах, модулях квантовой памяти [1], параметрических усилителей [2], работающих в гигагерцевом диапазоне. Классический вид копланарного волновода состоит из микрополосковой линии, отделенной по двум сторонам слоями заземления.

При наличии в сверхпроводниковой интегральной схеме несимметричных элементов, а также разрывов может произойти возбуждение паразитных мод, приводящих к рассогласованию элементов и к дополнительным потерям. Для подавления негативных эффектов, а также для реализации пересечений сигнальных линий необходимо соединять элементы схемы при помощи воздушных мостов, представляющих собой арочную структуру из сверхпроводящего материала. Относительно недавно был разработан процесс изготовления сверхпроводниковых мостов с использованием операции травления перемычки моста [3].

Использование мостов в сверхпроводниковых схемах накладывает ряд ограничений:

- 1) материал моста должен быть из сверхпроводящего материала;
- 2) необходимо полностью удалить диэлектрик между мостом и базовым слоем схемы;
- 3) недопустимо использование аморфных материалов в качестве жесткого поддерживающего слоя;
- 4) необходимо подобрать режим очистки, обеспечивающий чистоту схемы и устойчивость воздушных мостов.

Данные ограничения связаны с высокой чувствительностью сверхпроводниковых схем к загрязнениям и аморфным материалам, вносящим диэлектрические потери. При этом использование в качестве материала моста сверхпроводящего металла устраняет электрические потери от него.

В работе приводится технологический процесс изготовления мостов, включающий в себя предобработку поверхности, формирование моста, финальную очистку. Рассматривается влияние геометрических параметров мостов на их устойчивость. Также приводятся измерения таких сверхпроводящих параметров, как



критическая температура и критический ток. Полученный технологический процесс позволяет изготавливать воздушные мосты с шириной от 7 мкм и длиной от 17 до 70 мкм. Измеренный критический ток моста вблизи температуры абсолютного нуля составляет 13,8 мА.

Данные работы проводились в НОЦ ФМН. В результате была разработана технология изготовления алюминиевых воздушных мостов для сверхпроводниковых интегральных схем.

Литература

1. Sardashti K. et al. Voltage-tunable superconducting resonators: a platform for random access quantum memory // IEEE Transactions on Quantum Engineering, 2020. Vol. 1. P. 1–7.
2. Xue H. et al. Fabrication and characterization of all-Nb lumped-element Josephson parametric amplifiers // Chinese Physics B, 2021. Vol. 30. № 6. P. 068503.
3. Chen Z. et al. Fabrication and characterization of aluminum airbridges for superconducting microwave circuits // Applied Physics Letters, 2014. Vol. 104. № 5.

УДК 621.315.61

Маскирующие слои для плазмохимического травления толстых диэлектрических слоев слабоотвержденного Cyclotene 3022-63

Аворник Т. В., Гусева Е. А., Аворник О. Ф., Алмазов О. Б.

АО «ОКБ-Планета»

173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1п
avornikt@okbplaneta.ru

Проведен подбор маскирующего слоя для проведения плазмохимического травления (ПХТ) слабоотвержденного диэлектрика Cyclotene. Отмечены особенности данного материала и его взаимодействие с маской. Определен оптимальный маскирующий слой.

Ключевые слова: Cyclotene; диэлектрик; ПХТ; маскирующий слой; алюминий; титан; фоторезист.

Активное развитие СВЧ электроники в настоящее время предъявляет все более жесткие требования к миниатюризации компонентов, улучшению их быстродействия и качества. Одним из основных способов решения этих задач является применение технологии 3D-интеграции — создания многослойных, объемных структур.

Для отработки технологий 3D-интеграции было разработан квазимонолитный модуль на основе кремниевого интерпозера. Для межслойной изоляции был применен диэлектрик на основе полимеризованного бензоциклобутена (BCB) — Cyclotene 3022-63 компании Dow Chemical, позволяющий получить диэлектрическую пленку толщиной до 26 мкм. Он обладает низкой диэлектрической проницаемостью и уровнем электрических потерь, высокой стойкостью к травителям и хорошими планаризирующими свойствами.

Несмотря на все преимущества, высокая механическая напряженность пленки вызвала значительное искривление пластины [1] и в процессе создания многослойной структуры возникали трещины и происходило разрушение структуры. Для снижения напряженности диэлектрика было уменьшено время его отверждения. Изменение степени полимеризации повлияло на один из основных этапов формирования многослойной структуры — плазмохимическое травление межслойной изоляции. В данной работе описан подбор маскирующего слоя для ПХТ слабоотвержденного Cyclotene.

На начальном этапе использовалась маска алюминия, обладающая хорошей стойкостью к травлению во фторидной плазме. Тем не менее применение алюминия является компромиссным решением, так как необходимо учитывать и негативные явления [2]: возникновение «козырька» в верхней части отверстий и образование «травы» на дне отверстий [3]. Применение алюминиевой маски для ПХТ слабоотвержденного Cyclotene вызвало деформацию его поверхностного слоя.

Следующим этапом стало применение фоторезистивной маски на основе толстопленочного позитивного фоторезиста SUN-1170p компании Suntific. Основным недостатком является сложность контроля прозрачного фоторезиста на прозрачном диэлектрике на этапах проявления и ПХТ. Из-за развитого рельефа



многослойной структуры возникает разнотолщинность фоторезиста и диэлектрика, которая осложняет контроль процессов и приводит к утонению фоторезиста у краев отверстий. При ПХТ маска в этих местах быстро стравливается и открывает Суclotene, поверхность которого начинает подтравливаться. Удаление даже нанометрового слоя Суclotene вызывает значительное ухудшение его адгезионных свойств и отслоение металлизации в дальнейшем в местах воздействия плазмы.

Отсутствие воспроизводимого результата при использовании фоторезистивной маски свидетельствовало о необходимости применения маскирующего слоя на основе металла. В качестве замены алюминия был выбран титан. При напылении титана без нагрева подложки произошла деформация поверхности. В то же время при напылении титана на установке УРМ 3.279.017 с нагревом подложки пленки диэлектрика и металла оставались ровными. Так как маска титана толщиной 0,5 мкм позволяла стравить не более 14 мкм Суclotene, то в результате был подобран оптимальный маскирующий слой — комбинация титана толщиной 0,5 мкм и один слой фоторезиста Sun 1170p.

Литература

1. Self-Priming Low Stress Aqueous Developable Benzocyclobutene (AD-BCB) Photo-dielectric Material for Ad-vanced Wafer Level Packaging. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/d4e4/08de364324372ae508ef570df5d021483118.pdf> (дата обращения: 27.03.24).
2. Красников Г. Я., Гушин О. П., Кузнецов П. И., Есенкин К. С., Рубинас О. Р., Горнев Е. С., Каширин П. А., Колобова Л. А., Руденко К. В., Мяконьких А. В. Исследование и разработка процессов формирования топологии в толстых полимерных пленках бензоциклобутена (BCB) // *Электронная техника. Серия 3*, 2016. — № 2 (162).
3. Chen Q., Zhang D., Tan Z., Wang Z., Liu L., Lu J. Thick benzocyclobutene etching using high density SF₆/O₂ plasmas // *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2011. 29, 011019.

УДК 621.019.34

Повышение надежности микросхем через многофакторный подход и интеграцию системы менеджмента качества

Мкртчян Г. А.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34*

Микросхемы в микромодульном исполнении широко используются в авиации, космосе и медицине, но их производство часто сталкивается с высоким уровнем брака. Основные причины включают технологические ошибки и недостаточный контроль качества. Для повышения надежности требуется новая формула коэффициента качества производства, учитывающая многофакторный подход и элементы СМК.

Ключевые слова: коэффициент качества производства; СМК; надежность; многофакторный подход.

На сегодняшний день одним из ключевых элементов современной электроники являются микросхемы в микромодульном исполнении. Эти устройства, благодаря своей компактности и высокой плотности интеграции, находят широкое применение в различных отраслях, включая авиацию, космос и медицину.

Однако производство микросхем сталкивается с рядом проблем, одной из которых является высокий уровень брака. Согласно статистике, процент дефектных микросхем может достигать значительных величин, что оказывает негативное влияние на надежность конечных изделий. Основные причины брака включают в себя технологические ошибки, такие как неправильное размещение компонентов и проблемы с пайкой, использование некачественных или поддельных комплектующих элементов, а также недостаточный контроль качества на различных этапах производства. Эти факторы могут привести к коротким замыканиям, перегреву и другим сбоям в работе микросхем [1, 2].

Один из ключевых показателей надежности — это коэффициент качества производства (K_a), который определяет уровень требований к разработке и изготовлению аппаратуры. Ранее для его оценки уже применялись математические модели, основанные на интегральном коэффициенте K_a , предполагающем соблюдение всех условий научно-технической документации, однако этот метод оказался недостаточно точным, так как требования научно-технической документации часто нарушаются. В связи с этим возникает необходимость использования более сложного подхода, который учитывает разнообразные факторы, влияющие на отказы.

Существует много методов многофакторного расчета показателей надежности, таких как MIL-HDBK-217 и Telcordia SR-332, которые рассчитывают важный параметр надежности — интенсивность отказов. Эти методики при расчете учитывают конструктивные, производственные и другие виды отказов. К сожалению, они не берут в расчет коэффициент качества производства. На отечественных предприятиях коэффициент качества производства принимается во внимание, но сам по себе он не учитывает многофакторность, в отличие от данных методик. Поэтому важно интегрировать многофакторный подход с учетом коэффициента качества производства для повышения точности оценки надежности микросхем.



Важную роль в снижении уровня брака играет система менеджмента качества (СМК), подразумевающая процедуры входного и выходного контроля. Входной контроль включает проверку качества компонентов и материалов перед началом производственного процесса, тогда как выходной контроль направлен на проверку готовых изделий. Внедрение СМК как части многофакторного анализа поможет предприятиям лучше учитывать все факторы, влияющие на надежность, что позволяет более точно прогнозировать и предотвращать возможные отказы.

Таким образом, внедрение новой формулы, основанной на многофакторном подходе, который уже включает в себя элементы СМК, станет важным шагом на пути к улучшению качества и надежности микросхем.

Литература

1. Мишанов Р. О. Исследование признаков, видов, причин и механизмов отказов микросхем, выполненных по МОП-технологии // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2017. — Т. 2. — С. 228–234.
2. Varol S., Odougherty P. A Predictive Analysis of Electronic Control Unit System Defects Within Automotive Manufacturing // Journal of Failure Analysis and Prevention, 2022. Vol. 22. № 3. P. 918–925.



УДК 658.5.012.7

Контрольно-измерительное оборудование, применяемое при производстве изделий микроэлектроники

Нелюбин И. В.^{1,2}, Волоховский А. Д.¹

¹ ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

info@nm-tech.org

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Работа представляет собой обзор основных методов контроля параметров технологических процессов, типично применяемых при производстве изделий микроэлектроники с субмикронными топологическими нормами. Рассмотрены типовая конструкция и устройство установок, реализующих данные методы.

Ключевые слова: контроль процессов; оборудование; критические размеры; толщина пленок; метрология.

В субмикронной технологии производства изделий микроэлектроники контроль технологических процессов приобретает ключевое значение. С организационной точки зрения контроль техпроцессов на производстве объединяет в себя две составляющие: измерительные методики, включая операции контроля различных параметров полупроводниковых приборов и структур, а также обеспечение контрольно-измерительным оборудованием, реализующим измерительные методики. Непрерывное развитие микроэлектронной технологии («скейлинг», применение новых материалов, усложнение конструкции полупроводниковых приборов) обуславливает постоянное увеличение количества параметров изделий, подлежащих контролю. Кроме того, продолжается ужесточение требований к методам контроля, а именно требований высокой точности и воспроизводимости результата измерений, оперативности получения результата, высокой производительности и степени автоматизации и др.

В табл. 1 представлены основные параметры приборов и структур, а также соответствующее оборудование, используемое в производственном цикле.

Таблица 1. Измеряемые параметры и соответствующие методики измерений

Параметр	Методы измерений
Толщина пленок	Эллипсометрия, угловая рефлектометрия, спектрофотометрия (в едином исполнении); фотоакустическая методика
Размеры элементов	Автоматизированная растровая электронная микроскопия (CD-SEM), оптическая скаттерометрия (OCD)
Глубина канавок, высота ступенек, наклон стенок	Оптическая скаттерометрия (OCD), профилометрия, атомно-силовая микроскопия
Доза легирования	Термоакустическая методика
Концентрация примесей	Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия
Расположение литографических слоев	Интерферометрия белого света



В работе кратко рассмотрены установки, реализующие вышеуказанные методы измерений, а также принципы их работы. Показаны особенности измерительного оборудования, сочетающего в себе сразу несколько измерительных методик (комплементарные измерения). Ярким примером подобного оборудования является установка для контроля толщин прозрачных пленок, включающая в себя эллипсометрию (в различных модификациях), угловую рефлектометрию и спектрофотометрию видимого и ультрафиолетового диапазона. Учет возможностей и ограничений каждой из данных методик позволяет наиболее эффективно применять эти методики для операций контроля процессов осаждения многокомпонентных пленок и пленок сложного состава [1]. Также показано устройство установки для контроля толщин непрозрачных (металлических) пленок, реализующей фотоакустическую методику измерения толщины [2].

Рассмотрены особенности устройства установки оптической скаттерометрии. Данная методика построена на основе стандартной интерферометрической техники (спектральная эллипсометрия), и позволяет анализировать картины дифракции от периодических структур в целях восстановления их трехмерного профиля [3]. Отмечены преимущества в простоте оборудования в сравнении со стандартными инструментами контроля критических размеров (CD-SEM).

Также показаны особенности оборудования, применяемого для контроля процессов фотолитографии (рассовмещение слоев), ионной имплантации, травления, а также концентрации остаточных металлических загрязнений.

Литература

1. Fujiwara H. Spectroscopic ellipsometry: principles and applications. John Wiley & Sons, 2007.
2. Thomsen C., Maris H.J., Tauc J. Picosecond acoustics as a non-destructive tool for the characterization of very thin films // Thin Solid Films, 1987. Vol. 154. № 1–2. P. 217–223.
3. Chen X., Liu S., Gao W. Optical scatterometry for nanostructure metrology // Metrology, Precision Manufacturing, 2019. P. 1–37.

УДК 004.891.3:621.382.2/.3

Разработка комплекса оптической инспекции топологии микроэлектронных компонентов

Чученков Д. А., Васильченко Д. В., д. т. н. Ромащенко М. А.

Воронежский государственный технический университет

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

kpr@vorstu.com

В статье представлена разработка автоматизированного комплекса оптической инспекции топологии микроэлектронных компонентов, предназначенного для обнаружения и маркировки дефектов кристаллов полупроводниковых пластин. Комплекс включает устройство позиционирования, камеру высокого разрешения и специализированное программное обеспечение (ПО) с использованием алгоритмов машинного обучения. Разработка позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, повысить точность и скорость определения дефектов.

Ключевые слова: микроэлектроника; автоматизированная оптическая инспекция; искусственный интеллект; дефектоскопия; полупроводниковая пластина.

В современном мире стремительный рост микроэлектронной промышленности вызывает необходимость развития технологического оборудования. Отсутствие современных отечественных устройств для производства микроэлектроники не позволяет соответствовать современным стандартам. Зависимость от импорта специализированного оборудования делает предприятия уязвимыми к внешним экономическим и политическим воздействиям.

Микроэлектронная промышленность стремится к миниатюризации. Это обусловлено потребностью в создании более компактных, производительных и энергоэффективных электронных устройств. С уменьшением размеров компонентов возрастают требования к точности и разрешающей способности технологического оборудования. Отклонения от норм и дефекты в производимой продукции могут существенно повлиять на функциональные характеристики и надежность конечного продукта [1].

Автоматизированная оптическая инспекция (АОИ) в производстве микроэлектроники является важным инструментом для обеспечения качества и надежности изготавливаемого изделия. Современные системы АОИ позволяют проводить точный контроль на всех этапах производственного процесса, оперативно выявляя мельчайшие дефекты. Такой подход значительно снижает количество брака, что ведет к сокращению производственных издержек и повышению производительности. Высокая скорость и точность автоматизированных систем инспекции позволяют проводить массовую проверку продукта, обеспечивая его соответствие строгим стандартам качества и норм [2].

Разрабатываемый комплекс предназначен для автоматизированного обнаружения и классификации дефектов кристаллов на полупроводниковых пластинах. Программное обеспечение комплекса использует алгоритмы машинного зрения, в частности сверточную нейронную сеть на базе архитектуры ResNET. Для работы ПО требуется провести предварительное обучение. При этом оператор продолжает



свою обычную работу за компьютером, дополняя ее указанием дефектной области и обозначением типа дефекта. Данные действия производятся посредством интерфейса специализированного программного обеспечения (рис. 1). В процессе работы комплекс накапливает необходимые данные, тем самым обучаясь для последующего распознавания и классификации дефектов в автоматическом режиме.



Рис. 1. Классификация дефектов в ПО

Принцип работы заключается в следующем: оператор устанавливает стол в нулевые координаты, далее размещает полупроводниковую пластину и запускает процесс сканирования. Модуль позиционирования передвигает стол с заданным шагом. Камера высокого разрешения получает изображение участка пластины и передает его в ПО для дальнейшей обработки (рис. 2).



Рис. 2. Получение изображения

В результате создается карта дефектов, по которой система позиционирования автоматически маркирует области с дефектами.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие результаты. Разработан модуль автоматического позиционирования стола микроскопа (рис. 3). Создано специализированное программное обеспечение и алгоритм обработки изображения на основе методов искусственного интеллекта. Использование автоматического позиционирования и способа определения дефектов с помощью искусственного интеллекта позволит минимизировать человеческий фактор и увеличить скорость обработки изготавливаемой продукции.

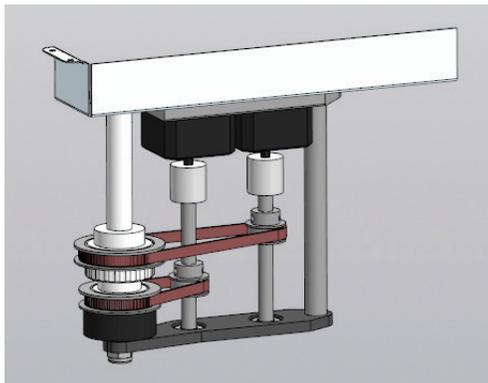


Рис. 3. Модуль автоматического позиционирования

Работа выполнена при финансовой поддержке федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках конкурса «Старт-23-1» (очередь II) (договор № 5049ГС1/89569 от 24.10.2023).

Литература

1. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие. 9-е изд., стер. — СПб.: издательство «Лань», 2021. — 480 с.: ил. ISBN 978-5-8114-0368-4.
2. Ромашенко М. А., Васильченко Д. В. Разработка аппаратной части комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2024. — Т. 20. — № 2. — С. 110–115. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.2.017. EDN CLR1YQ.



УДК 621.383.52

Фотодетекторы УФ-диапазона на основе ультратонких слоев GaN

Шубина К. Ю., к. ф.-м. н., Сеницкая О. А., Эннс Я. Б., к. т. н.,
Мизеров А. М., к. ф.-м. н.

Алфёровский университет

*194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8/3 лит. А
rein.raus.2010@gmail.com*

Изготовлены и исследованы УФ-фотодетекторы типа металл — полупроводник — металл на основе ультратонких эпитаксиальных слоев GaN. Приведены характеристики полученных фотодетекторов и краткое описание технологии их изготовления. Показаны варианты фотодетекторов с симметричным и асимметричным барьером Шоттки.

Ключевые слова: GaN; МПЭ ПА; УФ-фотодетекторы; структура металл — полупроводник — металл.

На сегодняшний день УФ-фотодетекторы (ФД) являются базовыми компонентами оптоэлектроники. Область их применения достаточно широка: от УФ-дозиметрии и контроля состояния УФ-излучателей до мониторинга озонового слоя и различных систем безопасности [1]. Одними из перспективных материалов для изготовления УФ ФД являются III-N-материалы, в частности GaN. Они обладают рядом преимуществ: за счет изменения состава, а значит, и ширины запрещенной зоны твердых растворов (Al)GaN (от 3,4 до 6,2 эВ), возможно управлять диапазоном спектральной чувствительности ФД, высокая подвижность носителей заряда обеспечивает хорошее быстродействие, а исключительная радиационная, тепловая и химическая стойкость позволяют приборам на основе III-N-полупроводников работать в жестких условиях и агрессивных средах [2].

Одним из факторов, сдерживающих активное внедрение полупроводниковых приборов на основе III-N-материалов, является крайне высокая стоимость III-N-подложек. В связи с этим в настоящее время III-N-гетероструктуры выращивают на решеточно-рассогласованных подложках, что приводит к высокой плотности дефектов, в частности дислокаций, в эпитаксиальных слоях. Для повышения качества эпитаксиальных слоев III-N используют различные буферные слои, темплейты, а также проводят преэпитаксиальную модификацию решеточно-рассогласованных подложек, что, в свою очередь, ведет к усложнению конструкции и удорожанию приборных гетероструктур. В то же время в последние годы в области сенсорики и детектирования излучения все большее внимание привлекают тонкие эпитаксиальные слои III-N-материалов, обладающие развитой морфологией поверхности, выращенные непосредственно на решеточно-рассогласованных подложках. Это объясняется не только простотой их получения, но и увеличенной площадью поверхности материала для эффективного взаимодействия со средой или излучением, а значит, повышенной чувствительностью по сравнению с планарными структурами при тех же размерах отдельного чувствительного элемента [3].

В рамках данной работы ультратонкие слои GaN с развитой морфологией поверхности были синтезированы методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (МПЭ ПА) непосредственно на подложках Al_2O_3 , были



изучены их морфология и свойства. На основе синтезированных эпитаксиальных слоев GaN были сформированы видимослепые УФ-фотодетекторы конструкции металл — полупроводник — металл с встречно-штыревой геометрией электродов с помощью стандартных подходов фотолитографии. Было создано два типа ФД: с симметричным барьером Шоттки с металлизацией Ni/Au и асимметричного типа, где один контакт омический Ti/Al/Ni/Au, а второй — Шоттки Ni/Au. Были исследованы характеристики полученных ФД и проведено их сравнение.

*Работы выполнены при поддержке Фонда содействия инновациям
(договор 12ГУПКЭС18/91736 от 27.12.2023).*

Литература

1. Rogalski A., Bielecki Z., Mikołajczyk J., Wojtas J. Ultraviolet Photodetectors: From Photocathodes to Low-Dimensional Solids // Sensors, 2023. Vol. 23. №9. P. 4452.
2. Morkoç H. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices Vol. 1: Materials Properties, Physics and Growth. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. 1257 p.
3. Goswami L., Pandey R., Gupta G. Epitaxial growth of GaN nanostructure by PA-MBE for UV detection application // Applied Surface Science, 2018. Vol. 449. P. 186–192.



УДК 004.4

Разработка маршрутов проектирования смарт-датчиков для автономных и космических систем

Аряшев С. С.^{1,2}, Верник П. А.³, к. т. н. Краснюк А. А.^{2,4}, Рошин Д. А.^{1,2}

¹ АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы»

125285, г. Москва, ул. Беговая, 13, подвал пом. 6, комн. 1

aryashev@nps-ses.ru

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

aakrasnyuk@mephi.ru

³ АНО «Институт стратегий развития»

107031, г. Москва, ул. Петровка, 15/13, стр. 5

center@isd.center

⁴ ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт»

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

petrovk@cs.niisi.ras.ru

Рассмотрены особенности разработки маршрутов проектирования (МП) на основе САПР с открытым исходным кодом для автономных смарт-измерительных и детектирующих систем. Смарт-измерительные и детектирующие системы должны обеспечить контроль наличия, в частности, патогенных микроорганизмов и вирусов на борту МКС и автономных аппаратов, работающих в комплексе с модулями управления на основе искусственного интеллекта (ИИ).

Ключевые слова: автономные системы; смарт-датчики; MPW; Open Source CADs.

Наличие радиационного фактора на борту пилотируемых и стационарных космических аппаратов создает предпосылки возможных патологических мутаций как вирусов, бактерий, так и генома основных форм живых организмов, что может иметь непредсказуемые последствия при контакте с объектами на поверхности Земли. Развитие технологий ИИ позволяет перейти к созданию автономных интеллектуальных (смарт-) датчиков широкого спектра действия. Представляет интерес развитие МП на основе САПР с открытым исходным кодом, позволяющим разрабатывать исследовательские проекты смарт-систем для космических приложений, в частности, в молодежных лабораториях университетов и в учебных дизайн-центрах для реализации по топологическим нормам КМОП 130–250 нм и запусками в рамках Multi-Project Wafer.

В процессе разработки маршрутов проектирования были выполнены следующие мероприятия:

- 1) изучение методологии и практик автоматизированного проектирования СБИС;
- 2) исследование и подбор САПР с открытым исходным кодом согласно единому реестру российского программного обеспечения;
- 3) освоение правил маршрута проектирования для интегральных транзисторных структур КМОП и КНИ КМОП;

- 4) ознакомление с бактериальным и вирусным содержанием на пилотируемых космических аппаратах;
- 5) определение состава и форм исполнения автономных смарт-измерительных и детектирующих систем;
- 6) разработка тестовых структур МП в САПР с открытым исходным кодом для автономных смарт-измерительных и детектирующих систем;
- 7) разработка лабораторного практикума для студентов вузов по автономным интегральным преобразователям.

Работа выполнялась в рамках программы «Сириус.Лето» при поддержке АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы», ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, РТУ МИРЭА, НИЯУ МИФИ.

Маршрут проектирования и правила проектирования используют решения для Open Source ПО: OpenROAD, OpenLANE или Qflow, а также отечественных САПР от НПК «Технологический центр» «Ковчег» для базовых матричных кристаллов (БМК) и базовых кристаллов (БК). Лабораторный практикум соответствует требованиям ФГОС 3+ и содержит учебно-методический материал для студентов вузов.

Результаты проделанной работы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты работы «Разработка маршрутов проектирования смарт-датчиков для автономных и космических систем»

№ п/п	Наименование этапа	Полученный результат
1	Освоение САПР схемотехнического проектирования	Подготовлены исходные данные для разработки тестовых структур; Изучены биокибернетические требования для пилотируемых КА. Разработаны ИМКД (исходные материалы для оформления ЭКД) для тестовых структур. Проведены опытные запуски САПР для проектирования.
2	Разработка и модельные испытания тестовых структур	Разработаны рабочие КД и ТД для лабораторного практикума. Разработаны программная, логическая модели. Разработаны тесты функционального контроля и контроля электрических параметров тестовых заданий лабораторного практикума. Передан в ДЦ РТУ МИРЭА проект лабораторного практикума.

Литература

1. Обзор современных САПР для ПЛИС. — URL: https://russianelectronics.ru/files/39084/Pages17-29%20from%20chip10-11_2008.pdf.
2. Стаховский В. В. Системы автоматического проектирования. Основная функция САПР. Требования, необходимые для создания САПР // Международный студенческий вестник, 2020. — № 1. — URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19884>.



УДК 004.4

Результаты создания маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ

Верник П. А.¹, Аряшев С. С.²

¹ АНО «Институт стратегий развития»
107031, г. Москва, ул. Петровка, 15/13, стр. 5
Center@isd.center

² АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы»
125285, г. Москва, ул. Беговая, 13, подвал пом. 6, комн. 1

Обосновывается актуальность и приводятся результаты работ по созданию компонентов отечественных САПР для маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ, в том числе системы управления жизненным циклом и средств обеспечения доверенности при производстве СБИС на недоверенных фабриках.

Ключевые слова: доверенная ЭКБ; контролируемое проектирование; САПР; управление жизненным циклом.

Для электронной промышленности открывается новый рынок специальной электронной компонентной базы (ЭКБ) для доверенных аппаратно-программных платформ, предназначенных для стратегических объектов и систем цифрового управления критической информационной инфраструктурой [1].

Актуальной является задача создания отечественных средств проектирования и управления проектами по разработке доверенной ЭКБ, а также инструментов обеспечения доверенности с учетом производства кристаллов на недоверенных фабриках.

Разработка сверхбольших интегральных схем (СБИС) является сложным процессом, включающим множество итерационно повторяющихся обменов данными между отдельными инструментами, базами данных и системами. Оптимизация этого процесса может быть достигнута применением системы управления жизненным циклом ЭКБ, что позволит также сократить в разы время вывода изделий на рынок.

В 2021–2024 гг. в рамках государственных мер поддержки отечественных разработчиков средств производства электроники АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы» и НИЦ «Курчатовский институт» — ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН был создан и в настоящее время проходит испытания опытный образец системы доверенного проектирования, построенной на основе собственных оригинальных решений.

Основными компонентами данной системы являются:

- система управления проектами и жизненным циклом изделий ЭКБ контролируемого маршрута «Золотой чип»;
- электронная база данных (БД) доверенных библиотек элементов и сложнотехнологических (СФ) блоков;
- программный комплекс подготовки конструкторской документации (КД) СБИС, верификации топологии и электрической принципиальной схемы СБИС, сборки проектов для мультизапусков;
- система поддержки маршрута контролируемого проектирования для испытаний и сертификации готовых СБИС при их изготовлении на недоверенном производстве.

Совокупность компонентов системы доверенного проектирования решает следующие задачи:

- проектирование СБИС;
- управление проектами и их отслеживание;
- контроль качества;
- верификация и подготовка к производству;
- производство изделий;
- управление комплексными проектами;
- управление продажами изделий.

Структурная схема системы доверенного проектирования представлена на рис. 1.

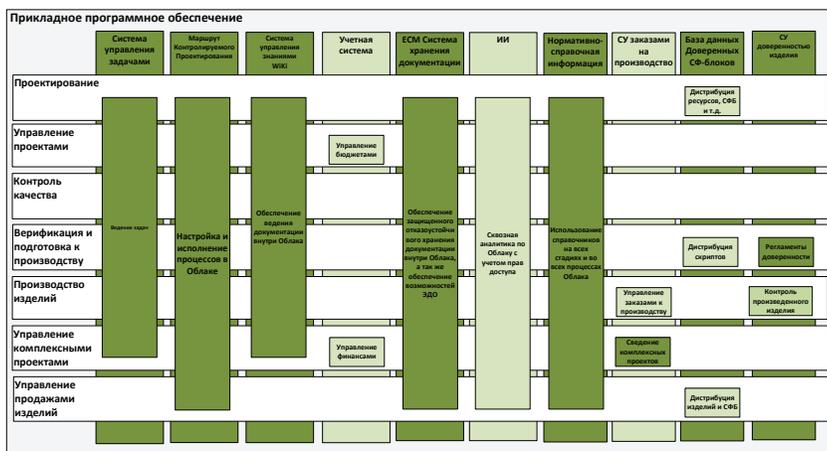


Рис. 1. Структурная схема системы доверенного проектирования

Система доверенного проектирования имеет облачную гибридную структуру с защищенным доступом через веб-интерфейс, что позволяет обеспечить ее гибкость и реализовать управление контролируемым проектированием.

Обеспечение доверенности разрабатываемых изделий реализуется на всех этапах проектирования, передачи на производство и испытания готовых образцов.

Литература

1. Попов С. А. «Микроэлектроника-2022» глазами связиста // Первая миля, 2022. — № 7. — С. 20–26.
2. Механик А. Г. Гром грянул, пора перекреститься // Стимул, 7 марта 2022. — URL: <https://stimul.online/articles/sreda/grom-gryanul-pora-perekrestitsya> (дата обращения: 16.08.2023).
3. Власов С. Е. Государством созданы условия для формирования отечественной инфраструктуры проектирования изделий радиоэлектроники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2021. — № 3. — С. 14–19.



УДК 004.312.44

Топологическое моделирование элемента ПЛИС с комбинированным кодированием

Васенин И. А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29
rector@pstu.ru, Vasenin.Ioann@yandex.ru

В статье предлагаются элементы с комбинированным кодированием переменных или связей, которые обеспечивают снижение задержки при вычислении логической функции или минимизацию конфигурационной памяти для мультиплексора маршрутизации связей. С помощью ПО Microwind было проведено топологическое моделирование предложенных элементов, которое подтвердило их эффективность по показателям временной задержки, потребляемой мощности и занимаемой площади кристалла.

Ключевые слова: ПЛИС; LUT; позиционное кодирование; унитарное кодирование; новый элемент; топологическое моделирование; оценки сложности.

При разработке цифровой аппаратуры все активнее используются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Актуальность подтверждается ростом использования ПЛИС в том числе в областях критического применения — медицине, авионике, космической технике, аппаратуре управления АЭС, военной технике, ежегодно возрастает число научных публикаций в различных журналах по данной тематике. Количество реализуемых логических функций увеличивается в одном элементе ПЛИС, а число таких элементов достигает десятков миллионов. Однако при увеличении числа функций снижается быстродействие элемента, поэтому повышения быстродействия при реализации такого же числа элементов является важной задачей. При росте числа элементов происходит увеличение числа связей, что приводит к возрастанию конфигурационной памяти межсоединений.

В работе представлены результаты топологического моделирования элемента с комбинированным кодированием, либо переменных при вычислении логической функции, либо связей мультиплексора маршрутизации. При этом достигается снижение временной задержки вычислений логической функции порядка 20% либо уменьшение конфигурационной памяти мультиплексора маршрутизации до 25%. Предлагаемый элемент защищен патентом РФ.

Литература

1. Тюрин С. Ф., Васенин И. А., Советов С. И. Логические элементы ПЛИС FPGA на основе комбинированного кодирования переменных // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления / Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, Information Technologies, Control Systems, 2023. — №46. — С. 83–107.
2. Васенин И. А., Тюрин С. Ф. Унитарное программирование LUT таблиц для ПЛИС // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. Материалы XIV Междунар. интернет-конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (16 нояб. — 31 дек. 2022 г.) / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. — Пермь: ПНИПУ, 2023. — С. 100–107.

3. Васенин И. А., Тюрин С. Ф. Топологическое моделирование элемента ПЛИС с комбинированным кодированием входных переменных // Автоматизированные системы управления и информационные технологии. Материалы всероссийской науч.-практ. конф. (г. Пермь, 7–9 июня 2023 г.). — Т. 1 / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. — Пермь: изд-во ПНИПУ, 2023. — С. 44–49.
4. Vasenin I. A., Sovetov S. I., Oputin N. E., Tyurin S. F. Advanced Logic Gates for FPGAs // Proceedings of the 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), June 29 — July 3, Russia, 2023 [Electronic resource] / IEEE, IEEE Russia Siberia Section. Danvers: IEEE, 2023. P. 110–115. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10225215> (дата обращения: 31.08.2023). DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225215.
5. Vasenin I., Tyurin S. F. One-hot Programming LUT for FPGAs // Proceedings of the Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (theory and practical applications) [Electronic resource]: November 20, 2023 St. Petersburg Russia 2023 / IEEE Russia North-West section, St. Petersburg Electrotechn. Univ. “LETI”. [s. 1.]: IEEE, 2023. P. 132–135. URI: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10424393> (дата обращения: 14.02.2024). DOI: 10.1109/MDP60436.2023.
6. Патент на изобретение RU 2811404, Программируемое логическое устройство № 2023120319: заявл. от 02.08.2023, опублик. 11.01.2024 / Тюрин С. Ф., Васенин И. А., Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Советов С. И.; заявитель и правообладатель — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».



УДК 004.94:621.3.049.77

Сохранение конфигурации топологии IP при иерархической миграции

Михайлова Е. А.^{1,2}¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**mea5022@mail.ru*² *ООО «НМ-Тех»**124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*

Статья посвящена разработке алгоритмов сохранения и улучшения конфигурации топологии ячейки при иерархической миграции. Рассматриваются общий маршрут иерархической миграции, проблемы поддержания электрической связности при автоматизированном переходе в новый технологический узел, а также решения, направленные на повышение качества топологии.

Ключевые слова: топология ИС; миграция топологии; автоматизация; САПР; иерархическая миграция; иерархическая топология; сохранение формы; сохранение симметрии; алгоритмы.

Миграция топологии — эффективный инструмент повторного использования спроектированных СФ-блоков путем автоматизированного переноса топологии из одного технологического узла в другой [1]. В процессе миграции комплексно решаются следующие задачи:

- выполнение конструкторско-технологических ограничений (КТО) целевой технологии;
- минимизация площади топологии;
- сохранение электрической связности между экземплярами ячеек в иерархии;
- сохранение заложенной инженером-топологом конфигурации топологии, к которой относятся: симметрия, регулярность, требуемая длина, ширина или форма проводников, и т.д.;
- исправление искажений, возникших при переходе на новые технологические нормы (улучшение топологии);
- выполнение рекомендованных правил проектирования (направленных на повышение процента выхода годных).

Основным этапом миграции, на котором происходит непосредственно переход к новым правилам проектирования, является сжатие топологии под контролем графа ограничений. При построении графа учитываются все КТО, что покрывает первую задачу из списка выше, а решением этого графа достигается минимизация площади, что относится ко второй задаче. Однако готового решения для остальных пунктов не существует. В настоящей работе рассмотрены подходы к решению задачи сохранения и улучшения исходной конфигурации, а также принципы сохранения электрической связности для иерархических СФ-блоков.

Для решения задачи сохранения конфигурации, которая определяется формой, размерами и взаимным расположением фигур, требуется базовый механизм сохранения расстояния. Данный механизм реализован в модифицированном алгоритме минимизации длины проводников [2], являющемся одним из шагов сжатия

топологии под контролем графа ограничений. Модифицированный алгоритм наряду с минимизацией длин проводников позволяет выдерживать заданные расстояния между парами сторон фигур.

Имея базовый механизм сохранения расстояний, можно не только выдерживать исходные расстояния между сторонами, но и задавать требуемые, а также, соответственно, улучшать исходную конфигурацию, к примеру выравнивать сегменты фигуры или вставлять избыточные контактные окна.

Помимо размеров фигур и расстояний между ними, при миграции иерархической топологии СФ-блоков необходимо сохранять электрическую связность между ячейками в иерархии. Миграция иерархической топологии выполняется снизу вверх по иерархии [3], а между ячейками одного уровня строится взаимосвязь на основе их взаимодействия в топологии; таким образом, по мере восхождения к более высокому уровню иерархии усложняется процесс подключения ячеек друг к другу. Следовательно, возникает необходимость сохранения исходного расположения точек подключения. Такой подход позволяет минимизировать влияние ячеек друг на друга и избежать конфликтов при решении графа.

Для сохранения симметрии и регулярности выделяются регулярные и симметричные группы объектов во входной топологии, а после применения новых КТО добавляются дополнительные требования на расстояния между сторонами, чтобы сохранить симметрию/регулярность. Для сохранения размеров, формы и взаимного расположения фигур предлагается сохранять ширину и длину сегментов фигуры, выравнивание горизонтальных/вертикальных сегментов фигур, расстояние между фигурами и включение одной фигуры в другую.

В настоящей работе рассматриваются общий маршрут миграции иерархической топологии, алгоритмы решения отдельных задач, возникающих в ходе его реализации, а также примеры использования механизмов сохранения и улучшения конфигурации топологии.

Литература

1. Калашников В. С., Керре А. Л., Розенфельд В. П., Семёнов М. Ю., Смирнов Ю. Г., Сотников М. А., Царапкин С. Ф. Ускорение перехода на отечественный технологический процесс с использованием автоматизированной миграции СФ-блоков // *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*, 2023. — С. 31–36.
2. Qianying Tang, Jianwen Zhu, Two-Dimensional Layout Migration by Soft Constraint Satisfaction // *Sixth International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED'05)*, 2005. P. 35–39.
3. Розенфельд В. П., Сотников М. А., Топузов И. Г., Улуханов Э. А., Широ Е. Г. Система сжатия и миграции топологии стандартных ячеек // *Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем — 2005. Сборник научных трудов / Под общ. ред. А. Л. Стемповского. — М.: ИППМ РАН, 2005. — С. 121–127.*



УДК 004.912:621.382

Внедрение современных методов разработки технической документации в средствах проектирования

Штрыков П. С., Седов В. В., Надин А. С.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

pshtrykov@niime.ru, vsedov@niime.ru, anadin@niime.ru

В данной работе рассматривается проблематика разработки технической документации в базовых текстовых редакторах, а также предложено ее решение в виде перехода на упрощенный язык разметки Markdown.

Ключевые слова: PDK; Markdown; HTML; автоматизация; техническая документация.

Введение

В процессе разработки PDK одним из важных этапов является разработка технической документации. Большинство текстовых редакторов не приспособлены к совместной и параллельной работе над документами. С ростом объема поддерживаемой технической документации все актуальнее становится проблема работы в команде. Для решения данной проблемы предложен Markdown [1].

Разработка технической документации в Markdown

Markdown — упрощенный язык разметки, предназначенный для преобразования текста в HTML. Он популярен среди программистов и других пользователей благодаря своему интуитивно понятному синтаксису. Также используется такими популярными сайтами и приложениями, как Github, Discord, Telegram, WhatsApp и др.

Сегодня есть два превалирующих подхода к форматированию документов: визуальный WYSIWYG («Что видишь, то и получишь») и основанный на разметке.

В редакторах WYSIWYG пользователи работают непосредственно в презентационной форме документа. Этот подход в редактировании имеет ощутимые преимущества: такие инструменты легко понятны большинству, и они дают немедленный визуальный отклик.

Во втором подходе редакторы на языках с разметкой привносят еще один дополнительный слой — пользователи редактируют текст, который смешивается с командами. И уже компилятор преобразует текст с разметкой в презентационный формат. Несмотря на то, что инструмент разметки вносит в рабочий процесс сложность на первоначальном этапе, это предоставляет широкие возможности для автоматизации. Второй подход, в свою очередь, можно разбить еще на два — стандартный и облегченный.

Таблица 1. Градация редакторов и языков разметки

Подход форматирования	Визуальный	Разметка	Облегченная разметка
Редакторы	MS Office «Р7-Офис» LibreOffice	TeX XML Typst	Markdown Textile BBCode

Для разработки технической документации не приспособлены редакторы первой категории в соответствии с табл. 1, а стандартный язык разметки слишком сложный и обладает чрезмерным функционалом. Принимая во внимание популярность, простоту синтаксиса, универсальность, широкую поддержку от множества платформ, богатый набор инструментов и активное использование и развитие среды российских компаний и программистов, из языков упрощенной разметки был выбран именно Markdown.

Заключение

В работе авторами рассмотрена проблематика использования стандартных текстовых редакторов в разработке технической документации, исследованы и сформулированы достоинства и недостатки упрощенного языка разметки Markdown, а также его отличия от распространенных аналогов. Авторами предложена концепция внедрения Markdown в разработку документации РДК с последующей автоматизацией ее генерации.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.



УДК 621.375

Быстродействующий КМОП операционный усилитель с широким динамическим диапазоном входных сигналов

Двинских П. Д.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

dvinskikh1975@gmail.com

В данной работе описан трехкаскадный быстродействующий КМОП операционный усилитель, который обеспечивает работу с сигналами в широком динамическом диапазоне входных напряжений. Благодаря своей симметричной структуре обеспечивается линейная работа усилителя в диапазоне напряжений от отрицательной шины питания до положительной. Операционный усилитель разработан с проектной нормой 180 нм и диапазоном рабочих напряжений от 0 до 1,8 В. Частота единичного усиления составляет 200 МГц, время установления выходного напряжения — 5 нс, коэффициент усиления в разомкнутом контуре — 64 дБ, запас по фазе — 60° и потребление — 1 мВт.

Ключевые слова: сложнофункциональный блок; КМОП-технология; операционный усилитель; аналоговая электроника; каскадные блоки; широкий динамический диапазон.

Операционный усилитель (ОУ) представляет собой универсальный блок, играющий важную роль в современной высокофункциональной аппаратуре. Эти устройства должны иметь набор параметров, удовлетворяющих разнообразным требованиям. ОУ используются как в цифровой технике, где важно быстродействие периферийных интерфейсов, так и в аналоговой электронике, где требуются высокая точность и линейность. Традиционные операционные усилители в составе сложнофункциональных блоков не обеспечивают широкого динамического диапазона входных сигналов без искажения их характеристик. Это ограничивает их применение в электронной технике. Операционные усилители, способные охватывать полный динамический диапазон входных сигналов, значительно расширяют возможности их использования как в аналоговой, так и смешанной аналого-цифровой аппаратуре.

Способность операционных усилителей работать с сигналами в диапазоне от отрицательной шины питания до положительной делает их универсальными для многих приложений, включая детекторную электронику. Благодаря поддержанию высокой точности и линейности во всем динамическом диапазоне такие усилители являются идеальными для использования в таких областях, как медицинская диагностика, научные исследования в области экспериментальной ядерной физики и физики высоких энергий, промышленная автоматизация, системы связи и другие направления исследований.

Конструкция операционного усилителя состоит из пяти основных блоков, показанных на рис. 1. Для решения проблемы с ограниченностью входного диапазона напряжений входной каскад построен на параллельно соединенных дифференциальных парах обоих типов проводимости. Для поддержания стабильности усиления входного дифференциального каскада была реализована схема gm-control для коррекции токов, протекающих в головном каскаде [1]. Колебания суммарной

крутизны входного каскада с использованием схемы gm-control не превышают 5%. В качестве нагрузки для входного дифференциального каскада используется свернутый каскодный усилитель. Для поддержания постоянного режима работы выходных активных элементов схемы используется схема задающего источника тока смещения. Выходной каскод операционного усилителя реализован по схеме усилителя мощности класса АВ [2].

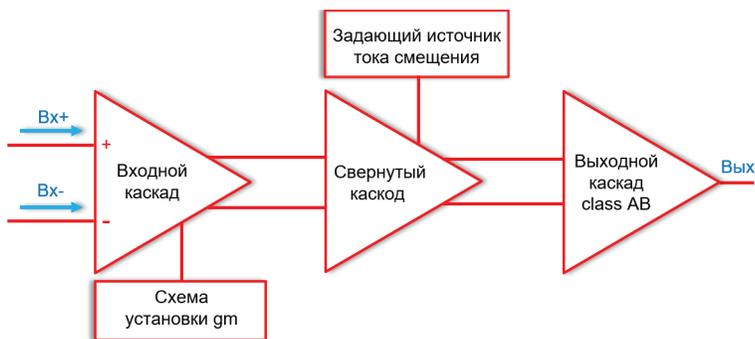


Рис. 1. Структурная схема операционного усилителя, работающего в широком диапазоне входных сигналов

Операционный усилитель имеет следующие характеристики:

- коэффициент усиления 60 дБ;
- запас по фазе 50°;
- частота единичного усиления 250 МГц;
- отклонение gm 1–5%;
- скорость нарастания выходного напряжения 300 В/мкс;
- время установления выходного сигнала 5 нс;
- потребляемая мощность 1 мВт;
- коэффициент ослабления синфазного напряжения 45 дБ;
- коэффициент влияния нестабильности источника 23 дБ.

Литература

1. Mohamed A. R., Ibrahim M. F. and Farag F. Automated design technique for constant-gm rail-to-rail for OTA input stage // 2012 24th International Conference on Microelectronics (ICM), Algiers, Algeria, 2012.
2. Del Cesta S., Catania A., Bruschi P. and Piotta M. A compact sub-1V class AB operational amplifier for low-voltage switched-capacitor circuits // European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD), Catania, Italy, 2017. 1–4 p.



УДК 621.382

Сложнофункциональный блок гибридного АЦП

Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Чербов А. Д., Норманов Д. Д., Аткин Э. В.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

DSLobanov@mephi.ru

Представлены результаты схемотехнической разработки гибридного АЦП с разрядностью 14 бит и частотой выборки 100 кГц, отличающегося малым энергопотреблением и занимаемой площадью. При проектировании использованы библиотеки КМОП 180 нм АО «Микрон». АЦП может быть использован для обработки сигналов матричных приемников.

Ключевые слова: АЦП; гибридный АЦП; матричные приемники; динамический компаратор; SAR; SLOPE.

В настоящее время большое распространение получили матричные приемники. Их используют во множестве направлений, таких как медицинская диагностика, системы видеонаблюдения, научные исследования и многие другие. Одной из важнейших частей таких устройств является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), к которому предъявляются требования по разрядности и частоте выборки в зависимости от области применения приемника. Важной особенностью таких АЦП является параллельная обработка большого количества столбцов матрицы.

В данной работе основным требованием является возможность использования АЦП в канале. Это накладывает серьезные ограничения на выбор архитектуры. В итоге был выбран вариант гибридного АЦП в следующей конфигурации: АЦП последовательного приближения (SAR) [1] определяет старшие 5 бит, счетный АЦП (SLOPE) [2] считает младшие 9 бит. На рис. 1 изображена структурная схема канального 14-битного АЦП.

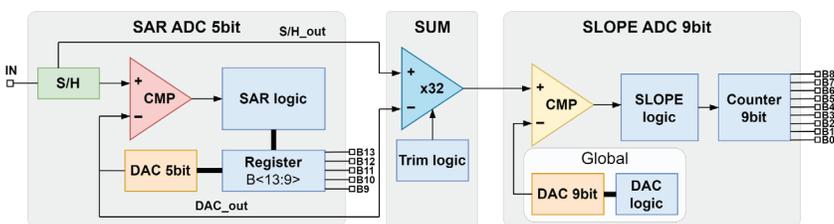


Рис. 1. Структурная схема АЦП

SAR АЦП выполнен по классической структуре. Одной из особенностей является использование динамического компаратора, что позволяет уменьшить энергопотребление схемы.

Для SLOPE АЦП в качестве источника линейно-возрастающего напряжения используется 9-битный емкостной ЦАП. Он является общим для всех каналов, что позволяет экономить место на кристалле. В схеме используется динамический компаратор с автокомпенсацией напряжения смещения, что позволяет уменьшить энергопотребление и повысить точность срабатывания.

Важным вопросом такой архитектуры является сшивка диапазонов SAR- и SLOPE-преобразователей. Для этого используется блок под названием SUM, который умножает разностный сигнал между входом и емкостной матрицей SAR на 32. Это позволяет растянуть измеряемый счетным АЦП сигнал до питания. Для обеспечения высокой точности преобразования предусмотрена тонкая подстройка блока. SUM представляет из себя операционный усилитель rail-to-rail по входу и выходу с емкостной обратной связью.

В результате была спроектирована схемотехника для сложнофункционального блока АЦП со следующими параметрами:

- разрядность 14 бит;
- ЕНОВ 13,28 бит;
- частота дискретизации 100 кГц;
- напряжение питания 1,8 В;
- дифференциальная нелинейность 1 МЗР;
- интегральная нелинейность 1,5 МЗР;
- потребляемая мощность канального АЦП 400 мкВт.

Литература

1. Fredenburg J. and Flynn M. P. ADC trends and impact on SAR ADC architecture and analysis // 2015 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), San Jose, CA, USA, 2015. P. 1–8. DOI: 10.1109/CICC.2015.7338380.
2. Ma Yan-Hua, Li Ji-Tong, Zhu Ming, Chang Yu-Chun. Optimal design of 10-bit single-slope ADC for CMOS image sensor based on swarm intelligent optimization algorithm // IET Circuits, Devices & Systems, 2021. 15. 10.1049/cds2.12070.



УДК 004.312

Разработка блока проверки целостности информации для встраиваемой флеш-памяти

Макеев Г. А.^{1,2}, Алексеев В. Д.^{1,2}, Васильев Е. С.¹

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
gmakeev@niime.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлен блок вычисления контрольной суммы CRC32 для содержимого флеш-памяти микроконтроллера с использованием языка описания аппаратуры SystemVerilog. Алгоритм реализован на базе комбинационной логики без использования сдвиговых регистров, что позволяет достичь высокого быстродействия при вычислении CRC для группы слов.

Ключевые слова: CRC32; SystemVerilog; флеш-память; микроконтроллер; целостность данных; контрольная сумма.

В современных защищенных микроконтроллерах в качестве энергонезависимого средства хранения информации используется встраиваемая флеш-память [1]. В флеш-памяти, как правило, размещаются операционная система, данные пользователя, секретные ключи для алгоритмов шифрования. Для хранения критических данных таких типов необходимо обеспечение механизмов защиты целостности информации в цифровой схеме микроконтроллера [2]. Эффективным способом обеспечения целостности данных, характеризующимся небольшими аппаратными затратами и высоким быстродействием, является добавление циклического избыточного кода (CRC) к блоку данных относительно небольшого объема [3]. На практике вычисление кода CRC в большинстве случаев реализуется в виде специализированного высокопроизводительного блока в структуре контроллера памяти [4].

Контроллер флеш-памяти инициирует начало операции вычисления избыточного кода, передавая адрес, данные строки и управляющие сигналы в блок вычисления CRC32. Контрольная сумма вычисляется для 32 слов строки, каждое из которых содержит 32 бита данных, и записывается в ее дополнительное слово. Блок принимает первое слово и с помощью комбинационной логики вычисляет для него избыточный код, используя в качестве значения по умолчанию код «0xFFFFFFFF», а после инкрементирует счетчик обработанных слов строки. Для следующего слова используется аналогичный алгоритм, однако в качестве начального значения CRC используется результат контрольной суммы для предыдущего слова. По описанному принципу выполняются вычисления для всех 32 слов строки, после чего блок передает контрольную сумму и сигнал завершения операции в контроллер, после же получения сигнала об успешном считывании CRC из блока счетчик обработанных слов сбрасывается.

На рис. 1 представлено условное графическое обозначение блока вычисления контрольной суммы CRC32 для строки флеш-памяти. Блок принимает запрос начала операции I_START_CRC_VALID и отвечает сигналом готовности O_START_CRC_READY. Сигнал I_ROW_ADDR задает адрес строки для вычисления избыточного кода, а блок формирует адрес слова O_WORD_ADDR для считывания

данных из флеш-памяти. Сигнал I_READ_VALID подтверждает завершение считывания данных и их готовность на входе I_READED_DATA для вычисления CRC. После вычисления контрольной суммы для всей строки блок разрешает сигнал O_CRC_VALID и передает избыточный код на выход O_CRC. Блок ожидает сигнал I_CRC_READY после завершения вычислений, чтобы передать данные и сбросить счетчик для начала новой операции. Вычисление избыточного кода для всей строки выполняется за 34 такта.

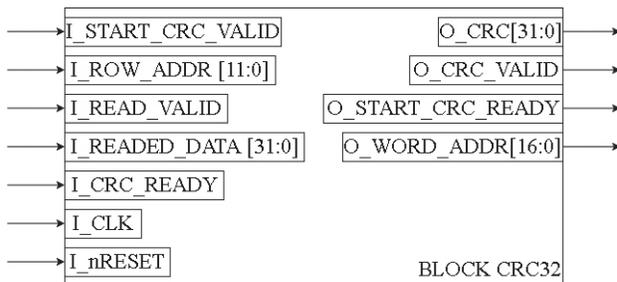


Рис. 1. Блок вычисления контрольной суммы

Предложено решение, при котором избыточный код реализуется для группы слов флеш-памяти общим объемом 1024 бита, и показано, каким образом реализованы вычисление и проверка данного кода. Таким образом, с применением описанных схемотехнических подходов удалось осуществить вычисление контрольной суммы для строки флеш-памяти с оптимальной производительностью и минимальными аппаратными затратами.

Литература

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. Нуйкин А.В., Кравцов А.С., Мытник К.Я. Перспективы развития универсальной защищенной программно-аппаратной платформы со сверхнизким потреблением для устройств Интернета вещей // Наноиндустрия, 2019. — № 5 (89). — С. 328–329.
3. Philip Koopman, Cyclic Redundancy Code (CRC) Polynomial Selection For Embedded Networks // Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks, DSN-2004.
4. Harris D. M., Harris S. L. Digital Design and Computer Architecture. Morgan Kaufman, 2013.



УДК 621.382:004.087.2

Разработка сложнофункционального блока однократно программируемого ПЗУ на базе отечественной КМОП-технологии 90 нм

Ермаков И. В., Демин К. П.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

iermakov@niime.ru, kdemin@niime.ru

Разработан СФ-блок однократно программируемого ПЗУ с конфигурацией 64×39 и площадью 307×544 мкм² на базе отечественной КМОП-технологии уровня 90 нм. Для проверки в кремнии СФ-блока был разработан тестовый кристалл с последовательным интерфейсом ввода-вывода, содержащий восемь блоков памяти.

Ключевые слова: КМОП; однократно программируемое ПЗУ; СФ-блок.

В современных микросхемах для хранения данных используются сложнофункциональные (СФ) блоки памяти ОЗУ, ПЗУ, ЭСППЗУ или Flash [1, 2]. Каждый из видов памяти имеет свои достоинства, недостатки и области применения, поэтому в составе системы на кристалле используются блоки памяти различных видов. ПЗУ подразделяется на масочное, в котором программирование происходит на этапе производства, и однократно программируемое (ОТР), которое может быть реализовано в виде пережигаемых током или лазером перемычек (Fuse) или пробиваемых конденсаторов (AntiFuse) [3]. Последнее представляется более перспективным, поскольку может быть запрограммировано с использованием одной дополнительной контактной площадки как на кристалле, так и в корпусе непосредственно пользователем в своих условиях, что гарантирует безопасность данных.

Для одной из самых современных отечественных КМОП-технологий уровня 90 нм был разработан СФ-блок однократно программируемого ПЗУ ОТР AntiFuse с конфигурацией 64×39 и площадью 307×544 мкм². В состав блока памяти помимо матрицы ячеек входят управляющие цифровые и аналоговые схемы (рис. 1). Аналоговая часть обеспечивает генерацию и регулировку тока чтения, формирование и подачу защитного напряжения [4], а также пониженного напряжения питания на схему чтения. Цифровая часть осуществляет управление и переключение между режимами работы. Дешифратор выбирает строки в матрице [5]. Схема записи управляет программированием ячеек памяти, а схема чтения преобразовывает электрическое сопротивление ячейки памяти в логическое состояние. Для снижения энергопотребления в блоке памяти реализовано отключение питания аналоговой части в режиме ожидания. Время доступа при чтении составляет 500 нс. Для программирования используется дополнительный вывод VPP. Размер слова в операциях записи и чтения — 39 бит, из которых 32 бит информационных и 7 бит могут быть использованы для коррекции. Изначально блок памяти разработан под техпроцесс с напряжением питания 2,5 В, а затем был мигрирован под техпроцесс с напряжением питания 3,3 В. В процессе миграции были обнаружены и устранены неисправности, возникшие по причине использования транзисторов с более высоким пороговым напряжением. Спроектированный блок обладает необходимым

набором файлов для встраивания в другие проекты, поэтому его можно отнести к категории СФ-блоков.

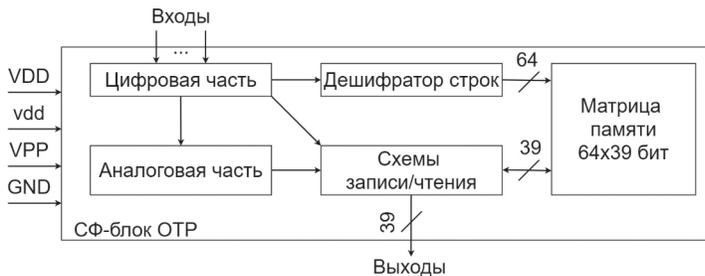


Рис. 1. Структурная схема СФ-блока OTP AntiFuse

Для проверки в кремнии и исследования характеристик СФ-блока был разработан тестовый кристалл с площадью $1650 \times 1850 \text{ мкм}^2$. В целях более эффективного использования площади было решено разместить в ядре тестового кристалла восемь блоков ОТП. Для уменьшения числа выводов и возможности общения с блоками памяти был реализован цифровой последовательный интерфейс обмена данных. Конфигурация и расположение контактных площадок тестового кристалла соответствуют 16-выводному корпусу под уже имеющуюся измерительную оснастку.

Литература

1. Красников Г. Я., Мещанов В. Д., Шелепин Н. А. Семейство микросхем ПЗУ информационной емкостью 4–64 Мбит для космических приложений // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2015. — № 2 (158). — С. 4–10.
2. Ermakov I. V., Losevskoy A. Y., Nuykin A. V., Shelepin N. A., Kravtsov A. S. Design and Study of a 65 Kb AntiFuse OTP ROM in a Standard 0.18 um CMOS Process // IEEE ElConRus, 2020. P. 112–115.
3. Ермаков И. В., Лосевской А. Ю., Нуйкин А. В. Электрически однократно программируемая энергонезависимая память на основе стандартной КМОП-технологии // Международный форум «Микроэлектроника-2019». Сборник докладов 5-й Международной научной конференции «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Наноиндустрия. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — С. 175–181.
4. Campardo G., Micheloni R., Novosel D. VLSI-Design of Non-Volatile Memories. Springer Berlin Heidelberg New York, 2010. 582 p.
5. Baker R. J. CMOS Circuit Design, Layout and Simulation // Sahibabad: Nisha Enterprises, 2013. 1044 p.



УДК 621.3

Разработка дизайна усилителя со сложным каскодом по технологии КМОП 90 нм

Шумов А. Д., Певцов Е. Ф.

МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

shumov_sasha@bk.ru

В стиле полужаказного проектирования приведен пример проектирования топологии усилителя со сложным каскодом с переключаемыми конденсаторами, изготавливаемыми по технологии КМОП 90 нм. Данный блок может быть использован для проектирования узлов более высокого уровня.

Ключевые слова: топология усилителя; системы автоматизированного проектирования СБИС; физический синтез; верификация проекта.

Введение

Каскодная топология, полученная путем размещения каскада с общим затвором в каскаде с общим истоком, сочетает в себе высокое входное сопротивление и большую проводимость схемы с общим истоком с качествами буферизации тока и лучшей частотной характеристикой схемы с общим затвором. Каскодная версия усилителя демонстрирует значительные улучшения параметров, а комбинация двух или более каскадов каскодных усилителей обеспечивает улучшенные характеристики [1]. Топология сложного каскада с PMOS с общим затвором и NMOS с общим истоком представляет собой модифицированную концепцию каскада, обеспечивающую более высокий коэффициент усиления, высокое выходное сопротивление, лучший коэффициент входного синфазного сигнала (ICMR) и более высокий коэффициент подавления источника питания (PSRR).

Разработка узла усилителя

В рамках работы спроектированы схема усилителя с переключаемыми конденсаторами и источник опорного тока IREF.

Принципиальная схема усилителя со сложным каскодом представлена на рис. 1. В ней транзисторы M17 и M46 представляют собой токовое зеркало, ток от IREF идет на транзистор M6, который работает в диодном включении. Дифференциальный каскад построен на транзисторах M29 и M31. В схеме также представлены переключаемые конденсаторы, которые используются для улучшения АЧХ усилителя.

Моделирование проводилось в утилите Analog Design Environment пакета Virtuoso (ADE) и симуляторе аналоговых схем Spectre. Для создания схемы тестовых воздействий в ADE используются файлы моделей аналоговых примитивов на языке spectre, а также сама моделируемая схема. Также спроектирован блок источника тока IREF, который подается на вход усилителя IBIAS.

Моделирование показало, что усилитель имеет следующие характеристики: полосу пропускания 275 КГц, усиление 59 дБ, частота среза 1,92 МГц, частота единичного усиления 200 МГц. Проведен анализ по технологическим «углам». Он показал, что микросхема сможет функционировать в диапазоне от -40 до $+100$ °C с медленными и быстрыми транзисторами с падением коэффициента усиления до 58 дБ.

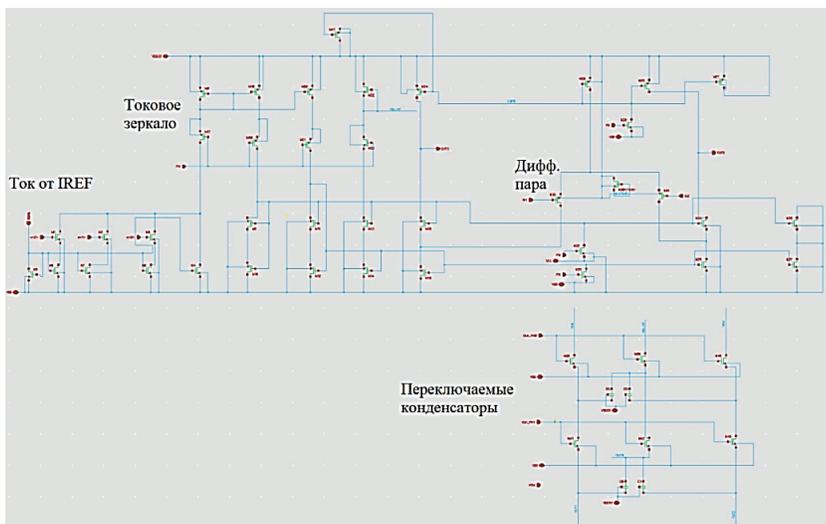


Рис. 1. Электрическая схема усилителя в базе технологической библиотеки

Разработка топологического чертежа

В интегральной КМОП-технологии существует потенциальная опасность взаимного расположения элементов, приводящего к образованию паразитных тиристорных структур. Основным механизмом, который приводит к возможности включения тиристора, является инжекция неосновных носителей в карман или в подложку [2].

В данном проекте при разработке топологии выполнены следующие решения для предотвращения тиристорного эффекта:

- транзисторы p - и n -типа расположены зеркально друг относительно друга;
- вокруг и между структурами, которые в совокупности могут образовать паразитный тиристор, размещены охранные кольца;
- элементы, подверженные тиристорному эффекту, расположены на большом расстоянии друг от друга;

После размещения элементов схемы выполнена их трассировка. При соединении элементов использовались два слоя металлизации, которые обозначены голубым и фиолетовым цветом, и слой поликремния (красный цвет). Чтобы обеспечить соединение общих сигнальных шин при стыковке ячеек в строки и столбцы, металлизация шин проходит по всей длине узла (рис. 2).

На последнем шаге разработки топологии ячейки считывания проводятся физическая верификация и экстракция параметров проекта с использованием графического интерфейса САПР Mentor Graphics Calibre и Cadence Virtuoso. Проект выгружается в формат *.gds для последующего изготовления на фабрике — изготовителе.

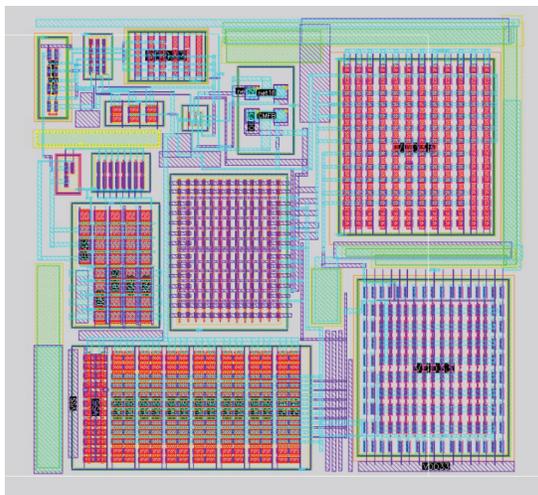


Рис. 2. Топологический чертеж усилителя со сложным каскодом

Выводы

На основе реальной технологической библиотеки с топологическими нормами 90 нм спроектирован аналоговый блок усилителя с коэффициентом усиления 59 дБ и полосой пропускания 275 КГц, частотой среза 1,92 МГц, частотой единичного усиления 200 МГц. Проведен анализ по «углам», который показал, что микросхема может функционировать в тяжелых рабочих условиях с падением усиления не менее 58 дБ. При проектировании топологии особую роль играла защита микросхемы от включения паразитного тиристора и предотвращения эффекта защелкивания в микросхеме. Дальнейшим развитием проекта может стать разработка на более высоком уровне абстракции таких блоков, как компаратор, ЦАП, АЦП.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание для университетов №ФГФЗ-2023-0005. Рег. №123052400076-8).

Литература

1. Baker R.J. CMOS: проектирование схем, компоновка и моделирование. John Wiley & Sons, 2019.
2. Эннс В. И., Кобзев Ю. М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем: Краткий справочник разработчика. — Горячая линия — Телеком, 2005.

УДК 621.382.3

Разработка системы быстрых тестов для проверки качества и функциональности файлов и инструментов PDK

Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

knasibullin@niime.ru

По мере разработки PDK возникает необходимость в сравнении исправлений и обновлений, внесенных после выпуска новой версии PDK. Для этих целей используются скрипты, программы, написанные с использованием языков программирования Tcl, Skill, Python, Shell и Perl операционной системы Linux. Одним из вариантов дальнейшего улучшения верификации является создание системы быстрых тестов, которые позволят сформировать обратную связь разработчикам после сборки или компиляции комплекта средств проектирования.

Ключевые слова: СБИС; PDK; верификация; тестирование; технологические библиотеки; маршрут верификации.

Комплект средств проектирования (PDK) — это набор файлов и моделей полупроводниковых приборов для определенной фабрики и технологического процесса, используемый при разработке СБИС.

Разработка PDK делится на два этапа — новая технология и новая версия PDK, при новой технологии параллельно с основной разработкой ведется QA разработкой для проверки командного файла, далее тестирование и отправка заказчиком, а при релизе новой версии PDK сначала — разработка, после — общее тестирование (ручное и автоматизированное) и отправка заказчиком.

Этап тестирования в среднем занимает от двух недель до месяца в зависимости от сложности технологии, и, если на этапе тестирования найдена ошибка, PDK передается заново в разработку и после исправления ошибки тестирование начинается сначала, таким образом, этап тестирования может увеличиться в несколько раз. Поэтому было решено внедрить в разработку систему быстрых тестов (рис. 1).

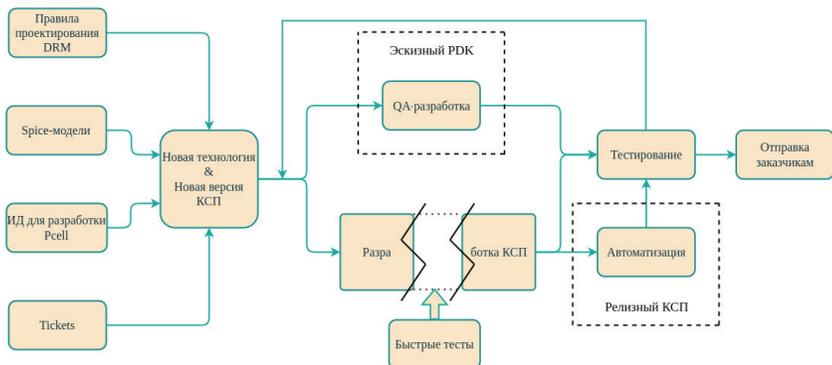


Рис. 1. Процесс разработки PDK с быстрыми тестами



Система быстрых тестов — это узконаправленные тесты, созданные для валидации корректности файлов, а также различных инструментов PDK после сборки или компиляции. Это автоматизированный код, который вызывает исполнение тестируемого модуля и проверяет один из результатов его работы.

Данный скрипт должен быть надежный, читаемый, поддерживаемый. Вместе с тем, что очень важно, этот код не должен иметь внешних зависимостей и обладать полным контролем над объектом тестирования. Именно это отличает быстрые тесты от интеграционных.

Если рассмотреть свойства системы быстрых тестов, то можно прийти к следующему набору качеств, которые такой тест должен иметь.

Исполняется автоматически и часто. Для этого тесты должны быть интегрированы в процесс. Библиотеки часто изменяются, и необходимо контролировать их качество с этой же частотой. Тесты должны исполняться в момент сборки. Лучше расширить список поводов для запуска тестов и включить в него ежедневные (ночные) запуски, запуск после сборки, запуск перед выгрузкой библиотеки в репозиторий.

Легкий во внедрении. Новые тесты должны легко внедряться в общий набор быстрых тестов.

Актуален (релевантен) в любое время. Это значит, что тест не теряет актуальность до тех пор, пока объект тестирования актуален (не подвергся изменениям или не удален).

Легко исполняемый. Каждый сотрудник отдела должен иметь возможность запустить тест. Это позволит любому быть уверенным, что после внесения изменений библиотека не повреждена.

Быстрый. Тесты должны исполняться за секунды. Это является гарантией того, что они будут исполняться часто.

Стабильный. Всегда должен быть один и тот же результат при каждом исполнении теста. Это одно из главных условий стабильности тестов.

Прост в анализе. Для облегчения анализа причин неуспешной проверки как минимум тест должен иметь понятную архитектуру и сообщать, какой результат актуальный, а какой ожидаемый.

Быстрое тестирование предлагает ряд преимуществ, которые улучшают эффективность разработки и обеспечивают надежность системы:

- удобство проведения тестов;
- раннее выявление ошибок;
- улучшение общего качества продукта;
- сокращение затрат времени и ресурсов;
- снижение рисков при интеграции компонентов.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.
2. Красников Г. Я., Шелепин Н. А. Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // Проектирование систем на кристалле: тенденции развития и проблемы: Тезисы докладов, Москва—Зеленоград, 19–21 октября 2010 года. Москва—Зеленоград: МИЭТ, 2010. — С. 55.



3. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.
4. Загидуллина О. Р., Надин А. С. Исследование LDE-эффектов и методов аттестации файлов DRC для субмикронных технологий 90–28 нм // Наноиндустрия. — 2020. — № S96-2. — С. 619–622.
5. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.



УДК 621.3.049

Снижение влияния паразитных элементов в высокочастотных ЦАП большой разрядности

Колосков Д. Б., Глухов А. В., к. т. н.

АО «НЗПП Восток»

630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60

dimakoloskov2009@gmail.com

В работе описан процесс улучшения характеристик 14-битного сверхвысоко-частотного ЦАП путем снижения негативного эффекта от паразитных топологических элементов. Результаты представлены в виде временной диаграммы выходных токов ЦАП.

Ключевые слова: ИС; ЦАП; статические характеристики; динамические характеристики; топология; паразитные элементы.

Современная сфера электронной техники остро нуждается в сверхвысокочастотных ЦАП и АЦП большой разрядности, при этом разработка таких устройств постоянно усложняется с ростом частоты и разрядности.

На предприятии АО «НЗПП Восток» в настоящее время разрабатывается сегментированный 14-разрядный ЦАП с частотой преобразования 1 ГГц. Технологией проектирования — КМОП 180 нм. Проблемой является существенное негативное влияние паразитных топологических элементов (сопротивлений и емкостей) на статические и динамические характеристики ЦАП, как было показано в наших предыдущих работах [1, 2]. В целях снижения этого влияния были проведены итерационные работы по экстракции значений паразитных элементов из разработанной топологии устройства и последующей коррекции топологии. Корректировки включали в себя максимально возможное уменьшение геометрических факторов возникновения паразитных емкостей, например площади перекрытия металлических шин (метод минимизации), а также компенсацию паразитных сопротивлений добавочными сопротивлениями в симметричных ветвях схемы (метод компенсации).

Результаты работы проверялись при помощи компьютерного моделирования по SPICE-моделям 3-го уровня. При помощи программных средств был проведен динамический анализ переключения младшего разряда разрабатываемого ЦАП в трех случаях:

- 1) без учета топологических паразитных элементов;
- 2) с учетом топологических паразитных элементов для базового варианта топологии;
- 3) с учетом топологических паразитных элементов для скорректированного варианта топологии.

Результаты расчетов показаны на рис. 1 в виде временной диаграммы токов и напряжений. Из диаграммы видно, что кривая выходного тока ЦАП скорректированной версии опережает кривую базовой версии приблизительно на 25 пс (на уровне 75 % от установившегося значения), что соответствует 22 % от времени установления сигнала базовой версии. Кроме того, в отличие от выходного тока базовой версии ЦАП, значение установившегося тока скорректированной версии практически полностью совпадает с запланированным значением выходного тока

(т. е. без учета паразитных элементов). Можно сделать вывод о том, что выполнение коррекции топологии методами минимизации и компенсации позволило значительно сократить негативное влияние паразитных топологических сопротивлений и емкостей на характеристики ЦАП.

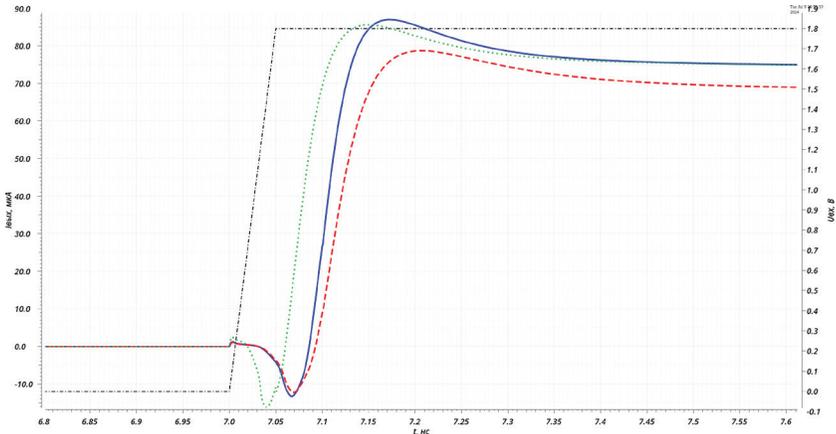


Рис. 1. Временная диаграмма токов и напряжений при переключении сигнала ЦАП. Черной линией показан входной сигнал, красной штриховой — выходной ток базовой версии ЦАП с учетом паразитных элементов, синей сплошной — выходной ток скорректированной версии ЦАП с учетом паразитных элементов, зеленой пунктирной — выходной ток ЦАП без учета паразитных элементов

Литература

1. Koloskov D., Dragunov V., Gluhov A. Application of Compensation Method for Layout Parasitic Elements Control in Precision DACs // 2023 IEEE 24th International Conference Of Young Professionals In Electron Devices And Materials (EDM), 2023. P. 420–423.
2. Колосков Д. Б., Драгунов В. П. Влияние топологических паразитных элементов на динамические характеристики сверхвысокочастотного 14-разрядного ЦАП // Наука. Технологии. Инновации. XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых, Новосибирск. 2023. — С. 52–56.
3. Микушин А. В., Сажнев А. М., Сединин В. И. Цифровые устройства и микропроцессоры. — СПб: БХВ-Петербург, 2010. — 832 с.



УДК 004.318

Организация предсказателя адресов переходов для инструкций с косвенной адресацией в составе RISC-микروпроцессора

Золотой Л. К.

АО «МЦСТ»

117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

zolotoi.lk@phystech.edu

Разработан модуль предсказателя адресов переходов для инструкций с косвенной адресацией в составе прототипа микропроцессора МЦСТ-R2000+. Приведено краткое описание реализованных алгоритмов. Указаны пути возможного улучшения представленных алгоритмов, направленные на повышение точности предсказания.

Ключевые слова: косвенная адресация; предсказание адресов переходов для инструкций с косвенной адресацией.

В современных программах гораздо чаще стали встречаться инструкции с косвенной адресацией, что еще больше повышает значение точного предсказания их результатов (адреса перехода) для производительности микропроцессора. В отличие от переходов с прямой адресацией, где адрес перехода известен статически и существенно только условие перехода, для команд с косвенной адресацией необходимо обращение к регистрам для определения точного адреса перехода, который меняется в соответствии со значением регистра, поэтому требуется существенно другая организация модуля.

В работе рассматриваются следующие варианты организации устройства предсказателя адресов переходов для инструкций с косвенной адресацией, поддерживающие выполнение инструкций не по порядку (out of order): адреса переходов предсказываются в порядке дешифрации, результат предсказания может определяться не по порядку:

- буфер адресов переходов (Branch Target Buffer);
- двухуровневый предсказатель с глобальной историей переходов (two-level adaptive predictor with globally shared history buffer);
- гибридный предсказатель;
- предсказатель переходов с геометрической последовательностью длин историй переходов (Geometric history length BP).

Основу модуля предсказателя адресов переходов составляют три функциональных блока: блок памяти, блок генерации ключа доступа к памяти, блок обновления предсказаний. Память хранит адреса переходов и информацию, необходимую для формирования предсказания. Блок генерации отвечает за доступ к памяти за предсказанием и использование истории переходов. Блок обновления предсказаний обновляет адреса переходов и сопутствующую им информацию в блоке памяти, основываясь на данных, полученных из конвейера процессора.

При разработке модуля предсказателя адресов переходов для инструкций с косвенной адресацией в составе прототипа микропроцессора МЦСТ-R2000+ были реализованы модели предсказателя — буфера адресов переходов и предсказателя с глобальной историей переходов, а также проведено сравнение эффективности их работы по результатам прохождения пакета тестов SPEC 2000. Предсказатель на основе

буфера адресов переходов показал среднее значение точности предсказаний 75%, предсказатель с глобальной историей переходов — 89%. Как итог, внедрение модуля предсказателя с глобальной историей в прототип привело к повышению его производительности при исполнении пакета тестов в среднем на 2%, на отдельных тестах — до 8%.

Литература

1. Hennessy J. L. and Patterson D. A. Computer Architecture: A Quantitative Approach. Morgan Kaufmann Publishers, 5th edition, 2011.
2. Karel Driesen and Urs Holzle. Accurate Indirect Branch Prediction // Proceedings of the 25th Annual International Symposium on Computer Architecture, 1998.
3. Karel Driesen and Urs Holzle // The Cascaded Predictor: Economical and Adaptive Branch Target Prediction // Proceedings of the 31st Annual International Symposium on Microarchitecture, 1998.
4. Sez nec A. Analysis of the o-gehl branch predictor // Proceedings of the 32nd Annual International Symposium on Computer Architecture, 2005.



УДК 004.318

Эффективный по занимаемой площади метод реализации аппаратной поддержки криптографической защиты информации

Зубрицкий И. В.^{1,2}, Альфонсо Д. М.^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

² АО «МЦСТ»

117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

В данной работе рассматривается метод по уменьшению площади, занимаемой модулями аппаратной поддержки криптографической защиты информации в микропроцессорах. Рассматриваются алгоритмы NIST FIPS 197 (AES) и ГОСТ 34.12 для 128-битных блоков («Кузнечик»).

Ключевые слова: криптографический алгоритм; аппаратная поддержка; AES; Кузнечик; поле Галуа; табличная замена.

Современные криптографические алгоритмы задействуют все более сложный математический аппарат, вследствие чего замедляется скорость обработки и передачи информации. В 2008 г. крупнейшая компания — разработчик микропроцессоров Intel добавила в свои продукты аппаратную поддержку стандарта шифрования NIST FIPS 197 (более известного как AES — Advanced Encryption Standard). Сравнение результатов производительности микропроцессоров на задачах шифрования и хеширования (табл. 1) [1] показывает, что для обеспечения необходимой скорости обработки информации микропроцессорам общего назначения требуется наличие в них аппаратной поддержки криптографических преобразований.

Таблица 1. Сравнение производительности процессора «Эльбрус-8СВ» с процессорами с аппаратной поддержкой криптографических преобразований [1]

Алгоритм	Время криптографического преобразования блока (тактов)		
	Без аппаратной поддержки («Эльбрус-8СВ»)	С аппаратной поддержкой (Intel)	
		+Iset. Ext. AES NI	+Iset. Ext. VAES NI CTR
«Кузнечик»	256	-	-
«Магма»	234	-	-
«Стрибог»	1124	-	-
AES	177	37	2,56

Для улучшения производительности микропроцессоров «Эльбрус» на задачах криптографии была реализована поддержка алгоритмов:

- 1) шифрование и расшифрование по стандарту NIST FIPS 197 (AES);
- 2) шифрование по стандарту ГОСТ 34.12 («Кузнечик»).

В результате работы поддержка стандарта шифрования AES была реализована в виде типового раунда шифрования/расшифрования (рис. 1). При реализации

стандарта NIST FIPS 197 основной задачей стала оптимизация по площади функций SubWord/InvSubWord и MixColumns/InvMixColumns. SubWord представляет собой табличную замену байтов [2], но ее непосредственная реализация в виде таблицы значений является излишне затратной по аппаратным ресурсам. В стандарте описан математический алгоритм формирования таблицы замены, в ходе которого используется операция нахождения обратного элемента в поле Галуа. Использование декомпозиции данной функции позволяет снизить аппаратные затраты при реализации функций SubWord/InvSubWord. Для оптимизации функций MixColumns/InvMixColumns требуется эффективная реализация умножения элементов в поле Галуа $GF(2^8)$. Потенциал для оптимизации заключается в том, что для реализации алгоритма шифрования необходимо вычислять произведение не произвольных байтов, а произведение байтов шифруемого блока непосредственно на константах, зафиксированные в стандарте NIST FIPS 197 [3]. В таком случае при умножении элементов поля $GF(2^m)$ можно сопоставить матрицы размера $m \times m$ с элементами поля $GF(2)$. Таким образом, осуществляется замена непосредственного произведения в поле Галуа на связку из набора побитовых операций AND и XOR.

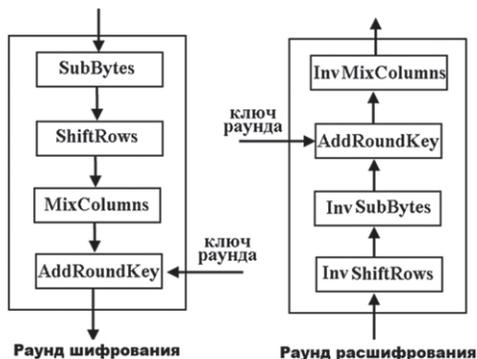


Рис. 1. Типовой раунд шифрования/расшифрования алгоритма AES

Поддержка стандарта ГОСТ 34.12 128 бит была реализована в виде операций, составляющих раунд шифрования. При аппаратной реализации стандарта ГОСТ 34.12 можно выделить две функции, которые требуют оптимизации: линейное преобразование и табличная замена в шифре «Кузнечик». Линейное преобразование состоит из 16 повторений определенной функции, которая сдвигает блок вправо на 1 байт, при этом в старший байт помещается результат определенной линейной функции от всех байтов блока, вычисленный в поле $GF(2^8)$ [4]. Каждое такое преобразование можно представить в виде умножения на матрицу размером 16×16 с элементами поля $GF(2^8)$. Аналогично оптимизации функций MixColumns/InvMixColumns алгоритма AES можно заменить элементы поля $GF(2^8)$ на матрицы 8×8 с элементами $GF(2)$, получив таким образом матрицу 128×128 , состоящую из элементов поля $GF(2)$. Тогда линейное преобразование алгоритма «Кузнечик» тоже заменяется набором битовых операций AND



и XOR. Оптимизация табличной замены алгоритма «Кузнечик» возможна благодаря исследованиям схемы возможного построения таблицы замены: основываясь на них, можно оптимизировать эту функцию аналогично оптимизации SubWord/InvSubWord алгоритма AES [5].

Литература

1. Советов П. Н. Перспективы аппаратного ускорения криптографии в процессорах архитектуры «Эльбрус» // XXIII научно-практическая конференция «РусКрипто-2021».
2. Federal Information Processing Standarts Publication 197 ADVANCED ENCRYPTION STANDART (AES) (2001).
3. Курганов Е. А. О глубине аппаратной реализации блочного шифра Кузнечик // Интеллектуальные системы // Теория и приложения, 2016. — 20:1. — С. 61–78.
4. ГОСТ 34.12-2018. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры. Государственный стандарт РФ.
5. Biryukov A., Perrin L., Udovenko A. The Secret Structure of the S-Box of Streebog, Kuznechik and Stribob. IACR Cryptol. ePrint Arch., 2015, 812.



УДК 621.3.049

Инструмент ускоренного высокоуровневого синтеза СФ-блоков обработки сигналов

Зарипов Р. А.¹, Зиновчик О. Ю.¹, к. ф. н., Чесноков В. Н.¹

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1а, корп. 1*

Разработан инструмент ускоренного высокоуровневого синтеза СФ-блоков для задач обработки потоковых сигналов. Инструмент генерирует Verilog-код СФ-блока из высокоуровневого описания на языке программирования Python. С помощью инструмента успешно синтезированы и проверены СФ-блоки с реализацией некоторых алгоритмов обработки изображений.

Ключевые слова: ускоренный синтез; генерация Verilog; Python.

Скорость эффективной реализации компактных СФ-блоков с низким энергопотреблением является ключом к высокой конкурентоспособности будущих устройств. Разработанный инструмент обеспечивает кратное ускорение процесса создания СФ-блоков для задач потоковой обработки сигналов. Ускорение достигается за счет автоматизации процесса дизайна СФ-блоков и их верификации. А именно: инструмент генерирует СФ-блок по описанию на языке программирования Python. Сгенерированный СФ-блок представлен в виде программы на языке описания аппаратуры Verilog. Таким образом, разработчик СФ-блока может сконцентрироваться на описании алгоритма на простом языке программирования Python, а не на деталях реализации на языке описания аппаратуры Verilog. Например, алгоритм повышения глобальной контрастности, описанный на рис. 1, синтезируется в несколько тысяч строчек кода на языке Verilog.

Отличительная особенность инструмента по сравнению с существующими инструментами HLS (High Level Synthesis) — сужение спектра решаемых задач, что позволяет качественнее и быстрее генерировать Verilog-код. Также инструмент создает бит-точную модель СФ-блока и оптимизирует промежуточные ширины данных.

Разработанный инструмент позволяет создавать СФ-блоки преимущественно для алгоритмов потоковой обработки данных. В этот класс задач входит обработка изображений, аудио, видео и радиосигналов. Специализация на потоковой обработке позволяет повысить качество генерируемых СФ-блоков.

Для верификации СФ-блоков обычно используется логический синтез или потактовая симуляция. Логический синтез сложных СФ-блоков и их потактовая симуляция может занимать часы. Разработанный инструмент генерирует бит-точную модель СФ-блока на языке программирования C++, что позволяет проверить сгенерированный блок за несколько секунд.

Разработанный инструмент уменьшает ширины данных промежуточных вычислений на основе анализа диапазонов значений и требуемой прецизионности индивидуально для каждой переменной. Разрядность широко распространенных чисел с фиксированной и плавающей точками может быть избыточной для конкретного алгоритма потоковой обработки. Например, для обработки HDR10 изображений достаточно использовать float разрядности 12 вместо типовой 32 [2].



```

def p_(x, n=0):
    # ненормированный полином Лежандра на [0, 1]
    if n == 0:
        return 1
    if n == 1:
        return x * 2 - 1
    return ((2*n-1) * p_(x, n=1) * p_(x, n=n-1) - (n-1) * p_(x, n=n-2)) / n

def p(n, x, n=0):
    # нормированный полином Лежандра на [0, 1]
    return p_(x, n=3) * (2 * n + 1) ** 0.5

def q(x, n=0):
    # интеграл нормированного полинома Лежандра на [0, 1]
    if n == 0:
        return x
    return ( p_(n+1, x) - p_(n-1, x) ) / (2.5 + n)

def pqs(x, N=0):
    # набор из P() и Q() функций на [0, 1]
    return (
        [p(x, n=n) for n in range(N+1)],
        [q(x, n=n) for n in range(N+1)]
    )

def gtm(i: Flexfloat, N=3) -> Flexfloat:
    # глобальный полиномиальный тонмаппер
    ps, qs = pqs(i, N=N)
    cs = mean(ps)
    return sum_vector(cs * qs)

```

Рис. 1. Алгоритм повышения глобальной контрастности на языке программирования Python

С помощью инструмента успешно синтезированы следующие СФ-блоки: алгоритм повышения локальной контрастности изображения [3], алгоритм быстрого преобразования Фурье, алгоритм «дебаеризации».

Литература

1. Зиновчик О.Ю., Чесноков В.Н. Система сверхбыстрого проектирования IP ядер обработки видеоизображений для ПЛИС // Труды 65-й Всероссийской научной конференции МФТИ в честь 115-летия Л.Д. Ландау, 3–8 апреля 2023 г. Радиотехника и компьютерные технологии. — М: Физматкнига, 2023. — С. 11–12.
2. Zinovchik O. Y., Chesnokov V. N., Zaripov R. A. Highly Efficient HDR Signal Processing for ASICs Using the Flexfloat Data Type // 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), 2024. P. 1–4.
3. Chesnokov V. Патент № 7302110, USA. PCT/GBO2/O1675. Image enhancement methods and apparatus. 11.2007.



УДК 621.319.55

Разработка прецизионного генератора опорной частоты 96 МГц

Гусихин И. В., Кудяков А. А.

АО НПЦ «ЭЛВИС»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14

В статье приведен отчет о разработке полностью интегрального генератора опорной частоты 96 МГц на основе RC-осциллятора. Технологическая норма — 28 нм. Рассмотрены методики калибровки частоты и методики компенсации температурной зависимости. Разработан осциллятор с потребляемой мощностью не более 240 мкВт и вариацией выходной частоты по отношению к внешним факторам не более 3%.

Ключевые слова: релаксационный RC-осциллятор; RC-осциллятор; генератор опорной частоты; на основе компаратора; калибровка частоты; температурная зависимость частоты; калибровка зависимости от вариации процесса; компенсация температурной зависимости.

На сегодняшний день полностью интегральные генераторы опорной частоты играют важную роль в создании энергоэффективных микросхем, таких как широкополосные оптические модули, АЦП, ЦАП и др. Генераторы опорной частоты обладают следующими преимуществами:

- отсутствие внешних компонентов;
- высокая максимально достижимая частота осцилляций;
- возможность калибровки выходной частоты;
- низкая потребляемая мощность;
- малая занимаемая площадь на кристалле.

Существуют факторы, влияющие на основные характеристики интегрального осциллятора, такие как статистическое рассогласование компонентов, разброс параметров технологического процесса и температуры. В рамках работ по созданию прецизионного RC-осциллятора:

- разработан низкопотребляющий широкополосный компаратор на основе симметричного ОИТУН;
- спроектирован ЦАП с токовым выходом для калибровки зависимости частоты от вариации параметров процесса и статистического рассогласования компонентов;
- проведена грубая компенсация зависимости опорной частоты от разброса температур;
- настроена точная калибровка температурной зависимости частоты.

Данные работы выполнялись специалистами компании АО НПЦ «ЭЛВИС». В результате был спроектирован полностью интегральный прецизионный генератор опорной частоты на основе RC-осциллятора в составе микросхемы широкополосного оптического приемо-передатчика.

Литература

1. Razavi B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits. Tata McGraw-Hill, Third edition, 2001.

2. Gudlavalleti Rajahari, Yashu Anand Varshne. and Subash Chandra Bose. A Novel Design Methodology for High Tuning Linearity and Wide Tuning Range Ring Voltage Controlled Oscillator. Springer-Berlin Heidelberg, 2013. CCIS 382. P. 10–18.
3. Jianguo Tan and Fang Tang. Temperature and process independent ring-oscillator using compact compensation technic // International Conference on Anti Counterfeiting Security and Identification in Communication (ASID), 2010. P. 49–52.
4. Panya S. and Thanachayanont A. Design and Realization of a Process and Temperature Compensated CMOS Ring Oscillator // International Conference on Electrical Engineer, 2012. P. 1–4.
5. Sundaresan K., Allen P. E., Ayazi F. Process and temperature compensation In a 7 MHz CMOS clock oscillator // IEEE J. Solid State Circuits, 2006. P. 433–442.
6. Basics of Operational Amplifiers and Comparators. Application Note 2021-03-261 © 2020–2021 Toshiba Electronic Devices & Storage.

УДК 621.37

Прототипная специализированная интегральная микросхема для съема и обработки сигналов с микрополосковых сенсоров

Ямалиев С. И., Аткин Э. В., к. т. н., Норманов Д. Д., Бочаров Ю. И., к. т. н.,
Бутузов В. А., к. т. н., Юровский В. О., Лобанков Д. С.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

SIYamaliev@mephi.ru

Разработана прототипная специализированная интегральная микросхема для трековой системы международного эксперимента $BM@N$. Приведены результаты разработки аналогового тракта и цифровой части микросхемы, результаты электрического моделирования в сравнении с измеренными при лабораторных испытаниях. Приведено описание методики испытаний, лабораторного стенда для подобного рода микросхем

Ключевые слова: СИМС; считывающая электроника; микрополосковые детекторы; КМОП-технология; кремниевая трековая система; $BM@N$.

Современное поколение экспериментов на ускорительных комплексах требует увеличения числа каналов считывающей электроники и в целом повышения степени интеграции, в первую очередь из-за значительно возросшей гранулярности детекторов. Это сопровождается ужесточением требований по многим аспектам, в том числе к функциональной сложности электроники, что может быть в полной мере реализовано только с использованием специализированных интегральных микросхем (СИМС). Так, отсутствие электронно-компонентной базы сдерживает развитие экспериментальной ядерной физики.

Микросхема предназначена для использования с кремниевыми микрополосковыми детекторами установки $BM@N$ (Baruonic Matter at Nuclotron) [1] на строящемся коллайдере NICA, г. Дубна. Непосредственное считывание сигналов должно происходить с микрополосковой кремниевой трековой системы (трекера) (англ. Silicon Tracking System — STS) [2] установки $BM@N$.

В состав СИМС (рис. 1) входят четыре основные части: аналоговая, аналого-цифровая, цифровая и часть, содержащая дополнительные и вспомогательные модули. Аналоговая часть состоит из зарядочувствительного усилителя [3], усилителя формирователя, блока контроля полярности, компаратора и пикового детектора. Аналого-цифровая часть состоит из аналогового мультиплексора и АЦП. Аналоговый мультиплексор передает через себя дифференциальный сигнал с выбранного канала на АЦП. Один 10-битный АЦП, работающий на все каналы, оцифровывает поступивший сигнал и передает данные на цифровую логику. Цифровая часть содержит блоки, SPI, логику переключения каналов, формирователь пакета и интерфейсную логику.

Прототипная микросхема имеет следующие характеристики:

- 10 аналоговых каналов считывания;
- динамический диапазон сигналов от 3,6 до 108 фКл;
- эквивалентный шумовой заряд 1300 е;
- разрешение АЦП 10 бит;
- частота дискретизации АЦП 20 МГц;

- скорость выгрузки данных 40 МГц;
- потребляемая мощность канала 4,5 мВт;
- размеры микросхемы 5×5 мм.

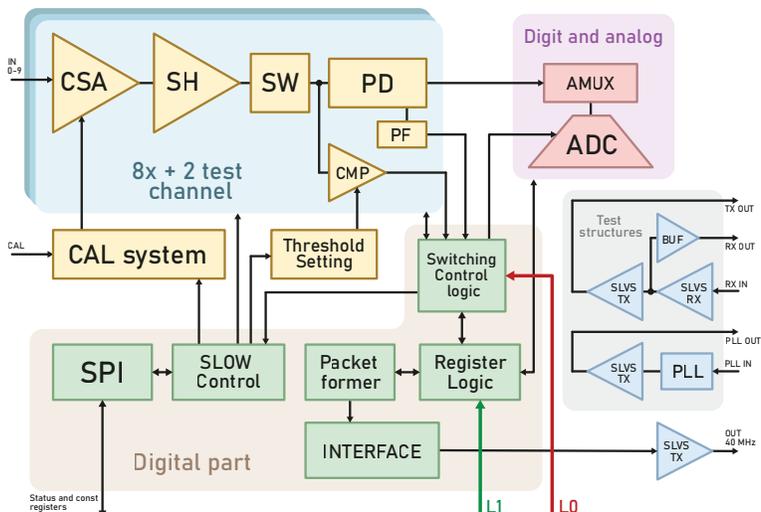


Рис. 1. Структурная схема СИМС

Данная работа выполнялась специалистами лаборатории проектирования специализированных интегральных микросхем НИЯУ МИФИ. В результате была спроектирована прототипная СИМС. Микросхемы являются полностью заказными и произведены по технологии КМОП 180 нм. Проведены лабораторные испытания и сформулированы рекомендации по улучшению полномасштабной 128-канальной микросхемы. Актуальность создания СИМС подчеркивается отсутствием выпускаемых интегральных микросхем данного класса.

Литература

1. Mikhail Kapishin for the BM@N Collaboration. Studies of baryonic matter at the BM@N experiment (JINR) // Joint Institute for Nuclear Research, 2019. DOI:10.1016/j.nuclphysa.2018.07.014.
2. Sheremeteva A., Kolozhvaria A., Dementeva D., Shitenkova M., Murina Yu. Quality Assurance Test System for Assembly of STS Modules for the BM@N Experiment // Joint Institute for Nuclear Research, 2022. DOI: 10.1134/S1547477123040593.
3. Аткин Э.В., Шумихин В.В. Зарядочувствительный усилитель с псевдодифференциальным выходом // Микроэлектроника, 2021. — Т. 50. — № 3. — С. 236–240. DOI: 10.31857/S0544126921020034.



УДК 621.3

Исследование ограничений минимизации площади топологии цифроаналогового преобразователя

Цепилова А.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

tsna2001@gmail.com

Проведено исследование ограничений, возникающих при минимизации площади топологии цифроаналогового преобразователя. Рассмотрены различные методы оптимизации площади ЦАП и предложены варианты взаимного расположения элементов схемы и межсоединений при топологическом проектировании ЦАП.

Ключевые слова: цифроаналоговый преобразователь; топология ИМС; минимизация площади; ограничения.

Такие периферийные элементы, как генераторы, ФАПЧ, АЦП, ЦАП и др., в интегральных микросхемах играют важную роль при обеспечении функциональности и производительности микросхем, а также позволяют улучшить взаимодействие микросхем с внешними устройствами. Проектирование топологии интегральных микросхем включает в себя соблюдение ряда правил и ограничений, от соблюдения которых зависят вносимые влияния на характеристики схемы. В случае проектирования ЦАП основными характеристиками являются статические и динамические характеристики, разрешающая способность, потребляемая мощность и занимаемая площадь на кристалле.

В данной работе предложен подход к исследованию ограничений минимизации площади топологии ЦАП, заключающийся в использовании модели, учитывающей вносимые паразитные эффекты, связанные с будущим взаимным расположением топологических слоев. Модель позволяет оценить изменение характеристик ЦАП после топологического проектирования и провести коррекцию схемотехнических решений. В рамках подхода определены влияния взаимных размещений элементов, токопроводящих шин, топологических структур, изолирующих колец и т.д. Проведенное исследование показало, что предложенный подход позволяет разработать топологию ЦАП без потери качества преобразования сигнала по сравнению со схемотехническим моделированием.

Одним из основных факторов появления вносимых влияний на характеристики схемы при топологическом проектировании является рассогласование элементов, определяющее случайный разброс параметров у идентично спроектированных приборов внутри одной интегральной схемы. Во избежание нарушения согласования электрических параметров аналоговых элементов в первую очередь следует обеспечить идентичное смещение по постоянному току в согласованной паре МДП-транзисторов во всех рабочих режимах. Согласование элементов может быть по току (например по току стока в токовом зеркале) или по напряжению.

Также немаловажны фиктивные (dummy) поликремниевые полоски либо фиктивные элементы, которые используются, чтобы минимизировать эффект подтравы поликремния на внешних сторонах после формирования изображения. Если фиктивных элементов не будет, то поликремний может быть вытравлен



больше на внешних границах затворов крайних секций, что может внести рассогласование между параллельными секциями одного транзистора или между несколькими транзисторами.

На примере топологии простейшего токового зеркала можно численно оценить вносимые изменения в характеристики схемы. Так, в случае несоблюдения основных правил топологического проектирования рассогласование «зеркальных» токов может доходить до 9 % относительно схемотехнического моделирования, при этом рассогласование двух токов стоков между собой может составлять более 3%. В разрабатываемом ЦАП такое рассогласование одного только токового зеркала может снизить количество эффективных битов на 0,5 бита. Тогда как при проектировании с соблюдением основных правил разница токов двух стоков транзисторов составляет менее 0,001 %, а отличие от схемотехнического моделирования — всего 0,44%. При этом разница в площади двух крайних вариантов может составлять около 20%.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке ИМС для создания компактных и эффективных ЦАП, что может привести к снижению затрат на разработку топологии, последующее производство и улучшение конкурентоспособности продукции.

Исследование ограничений минимизации площади топологии ЦАП представляет собой важный шаг в развитии электроники и оптимизации производства устройств. Рассмотренный подход отличается высокой степенью детализации и учетом различных аспектов, что делает его ценным вкладом в область проектирования цифроаналоговых преобразователей. Кроме того, используемый подход можно использовать для создания экспертных систем САПР в помощь разработчику схемотехники ИМС.

УДК 004.312

Разработка методики раскрытия содержимого ОЗУ микроконтроллера с использованием анализа энергопотребления

Алексеев В. Д.^{1,2}, Тишин А. С.¹, Михайлов В. Ю.^{1,3}¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
valekseev@niime.ru² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

³ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследованы источники утечек информации по боковым каналам энергопотребления в современных КМОП-схемах. Разработана методика и тестовое окружение для локализации всплесков энергопотребления микроконтроллера в целях раскрытия содержимого ОЗУ с использованием анализа потребляемой мощности чипа.

Ключевые слова: микроконтроллер; ОЗУ; атаки по сторонним каналам; анализ энергопотребления.

На сегодняшний день микроконтроллеры нашли применение практически во всех сферах человеческой деятельности. В частности, данные устройства используются для хранения и обработки конфиденциальных данных пользователя, что создает потенциальную угрозу утечки информации [1]. Архитектура микроконтроллеров содержит оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), в котором хранятся промежуточные данные, обрабатываемые процессором в ходе исполнения программного кода. Несанкционированный доступ к таким данным позволяет получить информацию о содержимом криптографических блоков устройства или нарушить работу программы.

Раскрытие данных, обрабатываемых микроэлектронными устройствами, может быть осуществлено с использованием исключительно программных методов, например подбором ключа алгоритма шифрования с применением известного шифротекста. Однако они не могут быть применены в случае отсутствия непосредственного доступа к данным: например, ОЗУ микроконтроллера взаимодействует исключительно с процессором и пользователь не имеет возможности получить информацию о его содержимом без изменения программного кода. В таком случае необходимо использовать информацию об аппаратных особенностях реализации исследуемого блока, т. е. осуществляя атаку по сторонним каналам [2].

Одним из наиболее эффективных способов раскрытия внутренних данных чипа выступают атаки по сторонним каналам энергопотребления, в ходе которых анализируется переключательная активность элементов электрической схемы. Поскольку все современные цифровые схемы построены на базе КМОП логических элементов, ключевой особенностью которых является значительный рост энергопотребления в динамическом режиме в сравнении со статическим, основной



задачей подобных атак выступает установление корреляции между зафиксированным всплеском энергопотребления устройства и количеством логических элементов, изменивших состояние на выходе в процессе переключения [3]. Далее информация о количестве переключившихся логических элементов может быть интерпретирована в виде числа разрядов исследуемого битового вектора, принявших значение логического «0» или «1», таким образом, значительно сокращается область перебора потенциальных значений [4].

На основании рассмотренного теоретического материала был разработан тестовый стенд и методика осуществления атаки на содержимое ОЗУ микроконтроллера с использованием анализа энергопотребления. Тестовый стенд включает в себя атакуемое устройство, т.е. микроконтроллер с некоторым объемом ОЗУ, обменивающийся данными с ЭВМ посредством интерфейса UART для реализации возможности изменения содержимого записываемых в память данных. К шине земли исследуемого устройства последовательно подключается резистор небольшого сопротивления, по величине падения напряжения на котором можно оценить величину тока, протекающего в цепи. Падение напряжения фиксируется при помощи осциллографа, взаимодействующего с ЭВМ для сохранения кривой энергопотребления на каждой итерации эксперимента. Методика проведения эксперимента включает в себя разработанный программный код для обмена данными с микроконтроллером и записи передаваемых значений в его ОЗУ. Таким образом, реализуется возможность получения кривых энергопотребления чипа для различных данных за один цикл работы устройства.

Литература

1. Нуйкин А.В., Кравцов А.С., Мытник К.Я. Перспективы развития универсальной защищенной программно-аппаратной платформы со сверхнизким потреблением для устройств Интернета вещей // Наноиндустрия, 2019. — № 5 (89). — С. 328–329.
2. Standaert F.X. Introduction to side-channel attacks // Secure integrated circuits and systems, 2010. P. 27–42.
3. Lathrop L. Differential power analysis attacks on different implementations of AES with the ChipWhisperer Nano // Cryptology ePrint Archive, 2020.
4. Dunkelmann O., Ghosh S., Lambooi E. Practical Related-Key Forgery Attacks on Full-Round TinyJAMBU-192/256 // IACR Transactions on Symmetric Cryptology, 2023. P. 176–188.



УДК 629.783

Разработка быстрого индикатора срыва сопровождения навигационного сигнала ГНСС

Калягин А. В.^{1,2}, к. т. н., Соколов И. М.²

¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20*

² *АО «АП Восход»
105318, г. Москва, ул. Ткацкая, 19*

Разработана и исследована методика индикации срыва сопровождения навигационного сигнала, основанная на частотном петлевом фильтре второго порядка. Оценены и приведены характеристики предлагаемого метода, проведено сравнение с традиционной моделью индикации по отношению сигнал/шум.

Ключевые слова: ГНСС; петлевой фильтр; сопровождение навигационного сигнала; первичная обработка сигнала.

На данный момент самым распространенным методом обнаружения срыва сопровождения навигационного сигнала является индикатор, основанный на оценке отношения сигнал/шум [1]. Если данный уровень выше определенного порога, данные сигнала берутся в расчет навигационной задачи, иначе — отбрасываются. Этот метод является довольно точным индикатором срыва, однако имеет низкую скорость реакции ввиду длительного времени оценки уровня сигнал/шум.

Время обработки может занимать свыше одной секунды. Первичные данные «сорванного» сигнала спутника продолжают поступать на этап вторичной обработки и участвуют в решении навигационной задачи, хотя на данный момент уже являются ошибочными. В связи с этим, пока не отработает индикатор срыва, выдаваемые координаты и скорости приемника могут значительно отклониться от реальных значений.

Данное исследование направлено на сокращение времени реакции приемника на срыв навигационного сигнала. Предлагается использовать в качестве индикатора другой параметр — оценку амплитуды ускорения из петлевого фильтра второго порядка [2]. Если ускорение для рассматриваемого сигнала превышает определенное пороговое значение, это означает срыв сопровождения сигнала. Преимуществом данного подхода является возможность моментального реагирования на срыв. Так как расчет ускорений проводится значительно чаще, чем решение навигационной задачи, некорректные параметры сигнала будут включены в расчет вторичных данных не более одного раза до того, как индикатор успеет среагировать. При этом отклонение первичных данных не успеет достичь критических значений, способных повлиять на результат вторичной обработки.

Однако такой подход может вызывать ложные срабатывания при высокой динамике объекта с приемником на борту. Если ускорение приемника превысит пороговое значение индикатора, есть риск ложной отбраковки большинства сопровождаемых сигналов спутников или полной потери навигации. Поэтому также рассматривается гибридный подход к индикации срыва сопровождения, показавший свою высокую эффективность и надежность за счет комбинирования преимуществ обоих подходов.



Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Радиотехника, 2010. — 800 с., ил.
2. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition. Artech, 2017. 723 p.

УДК 621.3.049

Использование кластеров микроэлектромеханических датчиков в навигационных системах

Кузнецов М. А.

МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

isau@mail.ru

В работе рассмотрена возможность установки кластера MEMS-датчиков и последующей параллельной обработки информации в целях повышения точности получаемых данных в навигационных системах.

Ключевые слова: MEMS-датчики; навигационная система; кластер.

Микроэлектромеханические датчики (MEMS) представляют собой соединение механических элементов, датчиков, а также приводов и электроники на одной кремниевой подложке. MEMS включают в себя ряд механических микроструктур, в частности микродатчиков, микроактюаторов и микроэлектроники, объединенных на кремниевом чипе. MEMS относятся к интегрированным системам (размер которых составляет от нескольких микрометров до миллиметров), объединяющим в себе механические, а также электрические компоненты [1].

Современные навигационные системы широко используют MEMS в качестве датчиков первичной информации, т. к. датчики, выполненные по данной технологии, характеризуются, как правило, низкой стоимостью, компактностью и малым весом, но при этом достаточно высокой относительной точностью. Характеристики и себестоимость MEMS-датчиков могут сильно отличаться в зависимости от конкретных технологий изготовления. Независимо от этого даже высокоточные, как правило, достаточно дорогие MEMS-датчики имеют существенный недостаток — высокий уровень шумов, что ограничивает их точность и, как следствие, точность решения навигационных задач.

Шум в MEMS-датчиках обусловлен рядом факторов, включая [2]:

- тепловой шум — случайные колебания заряженных частиц в материалах датчика, вызывающие хаотические сигналы;
- механический шум — вибрации и удары, влияющие на чувствительные элементы датчика;
- электронный шум — помехи от электронных компонентов, входящих в состав датчика.

Для преодоления проблемы шума в MEMS-датчиках предлагается использовать кластерную архитектуру, состоящую из нескольких датчиков, работающих параллельно. Причем подобная архитектура отличается от классических подходов по дублированию измерительных систем. В рассматриваемом подходе предполагается, что данные от нескольких датчиков и измерительных MEMS обрабатываются одновременно, в том числе с использованием параллельных алгоритмов обработки информации. В частности, подобные подходы могут быть реализованы за счет использования методов и алгоритмов комплексирования навигационной информации. Однако, внедрив параллельность обработки информации в комплексировании, можно существенным образом ускорить вычислительный процесс решения задачи комплексирования и, как следствие, повысить точность за счет того, что



освобождаемое процессорное время на бортовой вычислительной машине можно занять дополнительными алгоритмами фильтрации, оценки и обработки информации, которые могут повысить итоговую точность решения навигационной задачи. Однако у рассматриваемого подхода имеется существенный недостаток — необходимость достаточно мощного вычислителя, способного работать с несколькими потоками данных одновременно.

Литература

1. Калинкина М. Е., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л., Комарова А. В. Микро-электромеханические системы и датчики. — СПб: университет ИТМО, 2020. — 75 с.
2. Mohd-Yasin F., Nagel D. J., Korman C. E. Noise in MEMS // Measurement Science and Technology, 2009. 24 p.



УДК 621.3.049

Структура навигационных комплексов летательных аппаратов

Суркова А.Д.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

a.d.surkova@mail.ru

Рассмотрена архитектура навигационных комплексов летательных аппаратов, объединяющих различные навигационные системы и датчики для повышения точности и надежности определения местоположения.

Ключевые слова: навигационный комплекс; летательные аппараты; обработка информации; ИНС; ГНСС.

Современные требования к решению навигационных задач становятся все более сложными для реализации, что требует комплексного алгоритмического подхода к обработке данных. Для решения этих задач используют комбинации различных навигационных систем, датчиков и алгоритмов. Совместная обработка информации, как правило, реализуется методами комплексирования [1]. Объединение нескольких навигационных систем и датчиков в единую систему с алгоритмами комплексирования и обработки информации является навигационным комплексом (НК) [2, 3].

В состав НК, как правило, включают системы, физические принципы работы которых различны. Благодаря этому НК способен решать навигационные задачи практически в любых условиях полета. Состав пилотажно-навигационного комплекса (ПНК) обычно разделен на следующие функциональные группы:

- информационно-управляющее поле кабины летательного аппарата (ЛА): средства ввода-вывода, органы управления ЛА;
- навигационное оборудование: инерциальные навигационные системы (ИНС), глобальные спутниковые навигационные системы (ГСНС), доплеровский измеритель скорости и сноса (ДИСС), система воздушных сигналов и др.;
- электронно-вычислительная подсистема: бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ).

В настоящее время существует несколько подходов к задаче комплексной обработки информации в НК. Первый подход заключается в использовании в НК минимального количества систем и датчиков навигационной информации [4]. Такие НК позволяют получать достаточно высокую точность определения навигационной информации на борту ЛА, обеспечивают надежность работы НК, не требуют больших вычислительных затрат. НК такого типа, как правило, строятся по схеме ИНС + ГНСС, ИНС + ДИСС [5].

Второй подход, напротив, заключается в использовании максимально возможного количества измерительных систем и датчиков. Информация от датчиков и навигационных систем обрабатывается совместно. НК такого типа, как правило, включают в себя ИНС, РЛС, ДИСС, РСБН, РСДН и т.д. В теории подобные НК должны обеспечивать высокую точность и надежность навигации. Однако на практике точность может значительно снижаться из-за влияния активных и пассивных

помех. Кроме того, данный метод требует БЦВМ с высокой производительностью, что повышает себестоимость НК.

Третьим вариантом построения НК можно считать селективный подход [6]. Данный подход содержит в себе преимущества двух изложенных выше подходов. Селективные НК состоят из максимально возможного количества навигационных систем и датчиков и алгоритмического обеспечения. Для повышения точности этот вид НК в его алгоритмическом обеспечении содержит алгоритм выбора наиболее достоверной навигационной информации.

Алгоритмическое обеспечение рассмотренных видов НК может сильно отличаться. В современных НК внедряются алгоритмы с интеллектуальной компонентной и многоуровневой фильтрацией, оценением и обработкой информации, что в значительной степени может алгоритмически повысить точность определения навигационной информации.

Литература

1. Пролетарский А. В., Неусыпин К. А. Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». Спецвыпуск № 5. Информатика и системы управления, 2012. — С. 216–223.
2. Агеев В. М., Павлова Н. В. Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. — М.: Машиностроение, 1990. — 432 с.
3. Лукьянов В. В. Персональный навигационный комплекс // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение», 2006. — № 2. — С. 87–99.
4. Пупков К. А., Неусыпин К. А. Вопросы теории и реализации систем управления и навигации. — М.: Биоинформ, 1997. — 363 с.
5. Groves P. D. Principles of GNSS, inertia. and multisensor integrated navigation systems. Artech House, 2013. 800 p.
6. Селезнева М. С. Селективный измерительный комплекс для летательного аппарата // Наука сегодня: проблемы и пути решения. Материалы международной научно-практической конференции в 2 частях, 2016. — № 6. — С. 66–67.



УДК 004.233.2

Оптимизация передачи управления в процессорах «Эльбрус»

Бер Н. А.

АО «МЦСТ»

119049, Москва, Ленинский просп., 51

nikita.a.ber@gmail.com

В процессорах «Эльбрус» разработан новый метод оптимизации команд передачи управления. Он заключается в совмещении двух аппаратных способов — подготовки переходов и предсказания переходов. В статье объясняются особенности и преимущества такого метода, а также приводятся полученные результаты.

Ключевые слова: микропроцессор; передача управления; производительность; предсказание переходов; подготовка переходов.

Передача управления — это процесс перенаправления потока исполнения программы с одной ветви на другую. Он осуществляется при помощи инструкций перехода, которые присутствуют в наборе команд любой компьютерной архитектуры. Ввиду конвейерного устройства вычислительного тракта современных микропроцессоров проблема потери производительности при использовании таких команд является фундаментальной в области компьютерных наук, а задача по их оптимизации крайне актуальна на сегодняшний день. Потеря производительности возникает из-за того, что факт исполнения команды перехода становится известным на поздних стадиях конвейера, а более ранние стадии заняты инструкциями не из целевой ветви.

В науке известно немало способов, которые помогают эффективно работать с командами ветвлений. Самым популярным на сегодняшний день является предсказание переходов. Способ заключается в том, чтобы на основании динамически собираемой информации идентифицировать и исполнить команду перехода на ранних стадиях конвейера, тем самым сократив возникающую задержку между командой перехода и командами целевой ветви. Как правило, для достижения высоких показателей точности предсказания требуются значительные аппаратные ресурсы и сложные алгоритмы предсказания.

Другой известный способ оптимизации — метод подготовки переходов. Суть его заключается в том, чтобы к стадии фактического осуществления перехода конвейер располагал обеими подготовленными ветвями. Тогда исполнение перехода будет заключаться в выборе нужной альтернативы, следовательно, задержки между командой перехода и целевой ветвью не возникнет. Реализация такого метода требует меньших аппаратных затрат в сравнении с предсказанием переходов, но сопровождается другими особенностями. Одна из них — это то, что система команд должна быть построена таким образом, чтобы команда перехода разделялась на две инструкции: инструкцию подготовки передачи управления и инструкцию исполнения передачи управления. Инструкция подготовки содержит адрес передачи и размещается компилятором на несколько инструкций раньше команды исполнения. Выполнение инструкции подготовки инициализирует дополнительный параллельный конвейер, который дублирует некоторую начальную часть основного конвейера, а исполнение самого перехода переносит состояние параллельного

конвейера на основной. Число дополнительных подготовительных конвейеров определяется физическими ограничениями проектирования, главным образом критическими цепями. Поэтому в программах с большим числом ветвлений нехватка дополнительных конвейеров будет приводить к потере производительности. Такой аппаратный метод используют процессоры «Эльбрус» до 6-го поколения включительно.

В современной версии архитектуры был разработан новый метод, который совмещает в себе оба описанных способа. Система команд была расширена командами непосредственного перехода, работа по оптимизации которых ложится на аппаратный предсказатель переходов. В общем случае решение о том, какой тип передачи управления использовать, принимает компилятор.

Благодаря тому что часть сложных для предсказания переходов компилятор способен переложить на механизм подготовки перехода, объем затрачиваемого оборудования на реализацию предсказателя переходов можно уменьшить. В программах с большим числом ветвлений часть переходов осуществляется при помощи команд непосредственных переходов, таким образом, механизм подготовки переходов разгружается.

Добавленный предсказатель переходов увеличил производительность вычислительной машины. Дополнительным положительным свойством такой системы можно считать то, что выбор предпочтительного метода позволит разработчику программного обеспечения получить значительный отклик вычислительной машины от внесенных изменений в исходный код программы.

УДК 675.92.057.3

Разработка и исследование модуля управления портативными экструдерами

Бадалян Р. К., Мотайленко И. А.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
rbadalian@hse.ru, imotajlenko@hse.ru*

Объект исследования — печатная плата устройства по производству пластикового филамента. Была изготовлена ПП для управления экструдером, проведено моделирование тепловых процессов, выделяемых на ПП. Изучены критерии безотказности. Выявлены существенные метрики, влияющие на надежность прибора.

Ключевые слова: экструдер; тепловое моделирование; термистор; надежность электронных компонентов.

Печатные платы (ПП) являются важнейшими компонентами любой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), от корректной и точной работы которой зависит работоспособность, надежность, долговечность и безопасность всего устройства. В связи с этим особо актуальным становится вопросы исследования и производства действительно надежных ПП [1]. Не перестают проводиться исследования, направленные на улучшение надежности электронных компонентов, выявляются новые метрики надежности и редактируются существующие справочники и стандарты.

Первый этап проектирования включает разработку принципиальной схемы и выбор элементной базы. На этом же этапе определяется коэффициент нагрузки, так как этот показатель является одним из важнейших критериев, влияющих на безотказность РЭА [2]. На следующем этапе проводится моделирование тепловых процессов (рис. 1), на основе которого можно спрогнозировать перегрев и выход из строя компонента, а также использовать полученные данные для определения ключевых метрик надежности отдельных групп электронных компонентов. Имея всю информацию об электрической нагрузке, расчетные значения температур и режимы эксплуатации, рассчитали эксплуатационную интенсивность отказов разработанного модуля. Этих результатов было достаточно для изготовления прототипа модуля управления экструдером, на котором тестировались температурные алгоритмы. Параллельно с этим авторы изучили все метрики, влияющие на надежность РЭА, в соответствии с этими результатами была спроектирована альтернативная версия ПП, а время наработки до отказа увеличилось на 15000 часов. Имея изготовленный прототип ПП (рис. 2), исследовали температурные алгоритмы для преобразования сопротивления с термистора в значения температуры, внесли изменения в существующее уравнение Стейнхарта—Харта и β -уравнение [3], таким образом оптимизировав их для корректной работы с разрабатываемым модулем (1). Отдельно вывели формулу для преобразования выставляемого пользователем значения температуры в мощность для диммера тока (2).

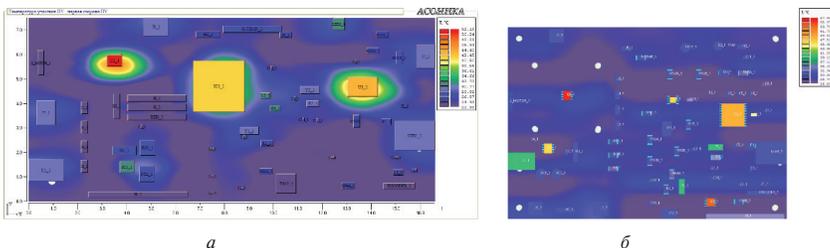


Рис. 1. Тепловая карта прототипа (а) опытного образца (б)

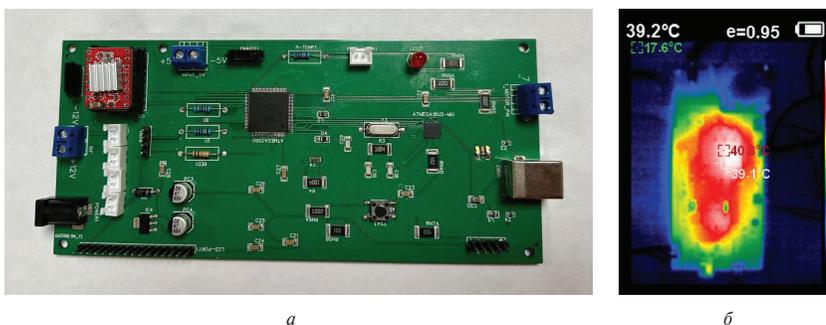


Рис. 2. Изготовленный прототип (а) и снимок с тепловизора печатной платы (б)

$$T = \frac{-\beta}{\ln\left(\frac{R_{th} + R_0}{R_0 + R_3}\right) - \frac{\beta}{T_0}} - 273,15, \quad (1)$$

где T — температура при конкретном значении R_{th} ; R_{th} — сопротивление термистора; $R_0 + R_3$ — модель, описывающая значение сопротивления термистора при контрольной температуре T_0 ; β — константа; R_3 — сопротивление проводника (высчитывается автоматически каждый раз при изменении температуры),

$$P_h = 0,001 T_0^2 + 0,0238 T_0 + 9,8056, \quad (2)$$

где T_0 — температура, установленная пользователем; P_h — мощность диммера.

В результате был изготовлен модуль управления бытовыми экструдерами, который совместим с другими аналогичными приборами. Изученные температурные алгоритмы также можно применять в других системах, проведя исследования, описанные в статье. Критерии оптимизации надежности можно учитывать при проектировании альтернативных РЭА.

Литература

1. Фам В. А. Допусковые методы прогнозирования и контроля показателей надежности прецизионных печатных плат радиотехнических устройств: Дис. канд. тех. наук: 05.12.04. — Москва, 2016. — 14 с.



2. Боровиков С. М., Троян Ф. Д., Цырельчук И. Н. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств // Министерство образования Республики Беларусь, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». — Минск, 2010. — С. 12–13.
3. Rana K., Kumar V., Kumar A., Chandel A., Kataria A. FPGA Implementation of Steinhart–Hart Equation for Accurate Thermistor Linearization // IEEE SENSORS journal, 2018. Vol. 18. № 6. P. 1–2.

УДК 621.3.079

Внедрение цифрового двойника через микрокомпьютер в систему управления и контроля литий-ионных аккумуляторов

Дружинин А. А.

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская., 1а, к. 1
druzhinin.aa@phystech.edu*

Спроектирована улучшенная система управления и контроля батареями благодаря применению микрокомпьютера и метода математического прототипирования энергетических процессов. Приведены графики переходных процессов и краткое описание полученной математической модели литий-ионной аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: цифровые двойники; архитектура ЭВМ; машинное обучение; авиационно-космическая электроника.

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) широко используются в современной технике, но обладают низкой устойчивостью к переразряду и перезаряду. Это может привести к снижению их ресурса и даже к авариям. Поэтому необходимость анализа физико-химических процессов (ФХП) в ЛИА для диагностики и прогнозирования их технического состояния становится все более актуальной [1].

Одним из перспективных направлений в решении этой проблемы является использование метода математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП) [1]. Этот метод позволяет создавать точные математические модели ЛИА на основе экспериментальных данных, вбирающий в себя методы современной неравновесной термодинамики, механики, теории электрических и магнитных цепей, теории электромагнитного поля.

Система управления и контроля батареями (Battery Management System, BMS) является важнейшим компонентом любой системы, использующей ЛИА. Однако существующие BMS имеют ряд ограничений, связанных с точностью и быстродействием датчиков измеряемых величин, а также с точностью и валидностью математической модели ЛИА.

В данной работе исследуется возможность интеграции цифрового двойника, созданного с помощью ММПЭП, в систему управления и контроля ЛИА посредством микрокомпьютера для улучшения процессов управления BMS. Ранее цифровой двойник ЛИА, созданный с помощью ММПЭП, был реализован на серверном компьютере и использовался для оптимизации управления ЛИА [2].

Результаты экспериментов показали, что интеграция цифрового двойника ЛИА, созданного с помощью ММПЭП, в систему управления и контроля ЛИА позволяет улучшить точность и быстродействие управления ЛИА. Кроме того, цифровой двойник ЛИА позволяет прогнозировать техническое состояние ЛИА и предотвратить аварийные ситуации [3].

Интеграция цифрового двойника ЛИА, созданного с помощью ММПЭП, в систему управления и контроля ЛИА посредством микрокомпьютера является

перспективным направлением в решении проблемы диагностики и прогнозирования технического состояния космического и авиационного оборудования. Разработка и реализация улучшенной системы управления и контроля батареями (BMS) на основе цифрового двойника ЛИА является актуальной задачей в современной технике.

Литература

1. Старостин И. Е. Построение на основе интерполяции моделей различных физических и химических систем методом математического прототипирования энергетических процессов // Надежность и качество сложных систем, 2024. — № 1. — С. 49–58. DOI: 10.21685/2307-4205-2024-1-6.
2. Starostin I. E. and Drujinin A. A. The concept of a software and technological platform for digital twins based on energy dynamics methods // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086710.
3. Старостин И. Е., Дружинин А. А. Аналитическое приближение решений уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов путем качественного анализа этих уравнений // Надежность и качество сложных систем, 2023. — № 2. — С. 22–31. DOI:10.21685/2307-4205-2023-2-3.

УДК 627.728

КВ-трансивер для гидрологического подвижного буйа

Васильев А. В., Вязенцев Я. А., Калюжный Б. К.

*Севастопольский государственный университет
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
yaaav04@gmail.com*

В статье представлен КВ-трансивер для гидрологического подвижного буйа, использующий зенитное излучение радиоволн КВ-диапазона частот. Этот метод обеспечивает двусторонний обмен данными на расстоянии до 1000 км для задач гидрологического мониторинга.

Ключевые слова: КВ-диапазон; зенитное излучение; гидрологический буй; трансивер; дистанционный мониторинг.

Современные системы гидрологического мониторинга требуют надежных и действующих средств связи для передачи данных с подвижных буйев. Традиционные системы, работающие в УКВ-диапазоне, ограничены прямой видимостью и не обеспечивают необходимой дальности. Спутниковые системы связи предусматривают дорогостоящее оборудование и высокую плату за передаваемый трафик. Решением является использование КВ-диапазона частот с зенитным излучением, что позволяет добиться значительной дальности связи без мертвых зон.

Предлагаемый КВ-трансивер предназначен для работы в диапазоне частот 2–8 МГц и использует антенну, максимум диаграммы направленности которой направлен вертикально вверх. Сигнал, отражаясь от ионосферы, распространяется на большие расстояния. Для двусторонней связи трансивер работает в полудуплексном режиме с временным разделением каналов. Недостатки использования КВ-диапазона частот — это невысокие скорости передачи информации и зависимость дальности связи от времени суток и сезона.

С береговой станции на буй передаются команды дистанционного управления, а в обратном направлении передаются результаты измерений гидрологической и атмосферной обстановки и данные телеметрии. Объем передаваемой информации небольшой. С учетом этого большая скорость передачи информации не нужна. Устранить влияние второго недостатка можно с помощью выбора заранее запрограммированного ряда частот и выбора из этого ряда частоты, которая обеспечит надежную связь для данного конкретного времени суток и сезона.

Была разработана приемно-передающая система связи КВ-диапазона. Также был разработан протокол передачи данных, позволяющий в реальном времени с минимальными задержками управлять подвижным гидрологическим буйем и передавать полученные буйем результаты измерений на береговую станцию.

Литература

1. Дроздов В. В. Любительские КВ трансиверы. — М.: Радио и связь, 1988.
2. Поляков В. Т. Радиолюбителям о технике прямого преобразования. — М.: Патриот, 1990.



УДК 004.31:654.924

Разработка модуля расширения функционала СКУД для отслеживания состояния контрольных точек и оповещения в Telegram

Фролов А. В., Бойков С. Ю.

*Ярославский государственный технический университет
150023, г. Ярославль, Московский просп., 88*

Разработан модуль расширения СКУД на ESP32 для мониторинга и отправки уведомлений через Telegram. Описаны характеристики, архитектура и процесс создания. Модуль позволяет повысить оперативность реагирования на нештатные ситуации.

Ключевые слова: СКУД; ESP32; Wi-Fi; IoT; Telegram; безопасность.

На сегодняшний день одним из перспективных способов повышения эффективности систем контроля и управления доступом (СКУД) является использование технологии IoT. Системы, построенные с использованием микроконтроллеров ESP32 и интеграции с мессенджерами, обладают следующими преимуществами:

- оперативное информирование о событиях;
- высокая скорость передачи данных;
- гибкость и масштабируемость системы.

Одним из факторов, сдерживающих активное внедрение таких систем, является отсутствие готовых решений для расширения функционала существующих СКУД. В рамках работы по созданию модуля расширения был разработан модуль на базе ESP32 для интеграции со СКУД, обеспечивающий мониторинг состояния контрольных точек и отправку уведомлений через Telegram.

Литература

1. Mr. Ayush G Ingole Home Security System Using IOT // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), 2024. DOI: 10.22214/ijraset.2024.62773.
2. Razzak I., Eklund P., Xu G. Introduction to the special section on securing IoT-based critical infrastructure (VSI-cei) // Computers and Electrical Engineering, 2022. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2022.108118.
3. ESP32 Series Datasheet. URL: <https://www.espressif.com> (дата обращения: 25.04.2024).
4. Перри Л. Архитектура интернета вещей. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 454 с.
5. Фролов А. В., Вологин А. Н. Эффективность языков программирования для ESP32: сравнение C++, MicroPython, Rust и TinyGo // 77-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. Сб. материалов конф. В 3 ч. Ч. 3. — ЯГТУ, 2024. — С. 128–132.

УДК 612.84

Структура системы оценки показателей зрения человека

Буцкий Д. О., Алешина А. И., Чиглинцева С. А.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
d.butskiy@gmail.com

Разработана система оценки показателей зрения человека, включающая три компонента: прибор для контроля состояния глазного дна, VR-очки и КЧСМ-прибор. Рассмотрены показатели оценки зрения и обоснован их выбор.

Ключевые слова: система оценки показателей зрения человека; заболевания глазного дна; критическая частота слияния мельканий; цветовосприятие; острота зрения.

С увеличением использования гаджетов растет число людей с проблемами зрения, особенно миопией. Миопия повышает риск дегенерации и отслоения сетчатки, катаракты и глаукомы, что может привести к необратимому ухудшению зрения и слепоте. Для предотвращения дегенерации зрения важно распознавать болезнь на ранних стадиях, но не всегда есть возможность посетить офтальмолога.

Для этого разработана система оценки показателей зрения с использованием мобильного приложения и трех приборов: для контроля состояния глазного дна, VR-очков и КЧСМ-прибора. Прибор для глазного дна проверяет его состояние по следующим критериям: норма, катаракта, глаукома, ретинопатия. При помощи VR-очков с таблицами Рабкина и Сивцева возможно выявить нарушения цветовосприятия и остроты зрения. КЧСМ-прибор определяет частоту световых мельканий, при которой сетчатка все еще может воспринимать их как отдельные вспышки, а не как единый оптический поток.

Для удобного взаимодействия с системой через голосовые команды в нее интегрирован голосовой помощник. Он поддерживает русский язык, распознает отдельные буквы и непрерывную речь, что облегчает использование системы.

В рамках исследования студентами НИУ ВШЭ была спроектирована система комплексной оценки зрения человека. В дальнейшем планируется разработка макета VR-очков с оптической системой для контроля глазного дна, интеграция голосового помощника в приложение и внедрение продукта на рынок для улучшения диагностики и лечения офтальмологических заболеваний.

Литература

1. Worldwide prevalence and risk factors for myopia. Wiley Online Library. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1111/j.1475-1313.2011.00884.x>.
2. Classification of Eye Diseases in Fundus Images // IEEE. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/9312710/09474508.pdf?tp=&arnumber=9474508&isnumber=9312710&ref=>.
3. Результаты исследования цветового зрения разными способами у детей с амблиопией // Российская Детская Офтальмология. — URL: <https://rdo.su/index.php/rdo/article/view/164>.



4. КЧСМ в определении зрительной работоспособности слабовидящих школьников. — Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича (ИППИ) РАН. — URL: <http://www.jip.ru/2002/GOL1.pdf>.
5. Humanizing voice assistant: The impact of voice assistant personality on consumers' attitudes and behaviors. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969698920312911>.



УДК 004.5

Алгоритмы, датчики и исполнительные устройства в человеко-машинном интерфейсе при управлении робототехническими комплексами в условиях недостаточной осведомленности об их состоянии и положении

Гладченко А. А., Тельминов О. А., к. т. н.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

agladchenko@niime.ru

В работе рассматривается комплекс дополнительных воздействий на оператора в условиях недостаточной осведомленности о состоянии объекта управления, варианты реализации, проводится анализ ключевых аспектов алгоритмов самосохранения у робота как защиты от некорректных действий оператора.

Ключевые слова: эргономика; РТК; датчики; ЧМИ; канал связи.

В работе рассматривается аспект влияния состояния оператора на управление робототехническим комплексом. Интерфейс взаимодействия человека и машины имеет три блока: оператор (человек), канал связи, РТК [1]. Коммуникация в рамках человеко-машинного интерфейса по беспроводному каналу происходит в формате передачи команды от оператора к РТК и передачи информации о выполнении команды РТК оператору. В момент, когда пропускная способность канала связи падает, корректная передача сигнала затруднена. Это может влиять на решения, которые принимает оператор.

В зависимости от задач РТК может функционировать в трех режимах: автоматический, полуавтоматический и ручной. Существует ряд отвлекающих факторов, потенциально способных повлиять на поведение оператора и адекватность управления РТК. В частности, на управление может повлиять физическое состояние оператора [1].

В качестве решения проблемы стоит рассмотреть механизм передачи дополнительной информации о состоянии оператора РТК. Отслеживать состояние оператора можно с помощью регистрации его внимания на экране по алгоритмам, основанным на методе Виолы — Джонса [2]. Более полное представление о состоянии оператора и определении его работоспособности может быть получено при помощи дополнительных параметров, считываемых датчиками. Алгоритмы, основанные на удаленной динамической оценке состояния оператора и обработке полученных данных РТК, смогут обеспечить выполнение задания РТК вне зависимости от состояния оператора. Результаты анализа робототехническим комплексом состояния оператора могут быть использованы в разработке сценариев [3] поведения РТК в типовых ситуациях. Типовые ситуации можно заранее заложить в нечеткую базу знаний робота, что поможет составить набор правил поведения (тактик), соответствующих его движениям и задачам.

Руководствуясь этими тактиками, РТК может принять решение об аварийной остановке работы и/или запросить дополнительное подтверждение операции.

В случае потери оператором концентрации при выполнении задачи решением может стать обеспечение обратной связи от РТК. В качестве механизма,

обеспечивающего отпавку коммуникативного сигнала от машины к человеку, рационально будет использовать вибротактильную коммуникацию [4] как дополнительный физический способ взаимодействия по привлечению внимания оператора к выполнению задачи.

Литература

1. Галин Р. Р., Галина С. Б., Мамченко М. В. Подход к распределению работ в коллаборативной робототехнической системе с учетом модели рабочего пространства и динамического переназначения исполнителей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН, 2023. — № 6 (116). — С. 21–32.
2. Viola P., Jones M.J. Robust Real-Time Face Detection // International Journal of Computer Vision, 2004. Vol. 57. № 2. P. 137–154.
3. Мамченко В. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686142, Российская Федерация. Программа для формирования и визуализации облака точек рабочих пространств робота и человека и области пересечения их рабочих органов: № 2023684823, заявл. 21.11.2023, опубли. 04.12.2023 / М. В. Мамченко; заявитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук.
4. Спиркин А. Н. Бионические методы управления роботизированным механизмом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2020. — № 4 (34). — С. 84–91.

УДК 621.382

Методы повышения качества обслуживания трафика нагруженных сетей с применением высокоскоростного тракта обработки сетевых пакетов

Горчакова М. А.^{1,2}, Елизаров С. Г.³, Гончаров С. В.³, Тельминов О. А.²

¹ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

² *АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

³ *MALT system
119333, г. Москва, ул. Фотиевой, 5, стр. 1*

Проведен сравнительный анализ методов повышения качества обслуживания трафика на основе их программной реализации. Предложена оптимальная архитектура сетевого процессора на основе наиболее эффективного метода приоритизации пакетов данных.

Ключевые слова: QoS; VQC; Strict Priority; Round Robin; Fair Queuing; Weighted Round Robin; Weighted Fair Queuing.

С развитием сетей связи, совершенствованием мобильных устройств и постоянным ростом числа пользователей объем передаваемой информации возрастает ежегодно. Только в России интернет-трафик за 2023 год вырос в среднем на 26% [1], поэтому создание устройств, способных обрабатывать трафик с высокой частотой поступления входящих пакетов данных с минимальными потерями, приобретает все большее значение. Среди применяемых решений используются блоки приоритизации передаваемых данных с заранее определенными алгоритмами обработки сетевых пакетов с узким набором анализируемых полей и заголовков. Однако данная проблема может быть решена с помощью программируемого сетевого процессора, позволяющего исполнять произвольные программы, в том числе реализующие алгоритмы управления и приоритизации трафика. В данном случае изменение программ выполняется в динамическом режиме без внесения аппаратных изменений или изменения архитектуры устройства.

В рамках работы выполняется исследование реализации конвейерного сетевого процессора для приоритизации сетевого трафика в коммутационных устройствах, предназначенного для управления сетевым трафиком в КМОП-изделиях микро- и нанoeлектроники [3], с возможностью динамического изменения алгоритмов обработки сетевых пакетов и алгоритмов управления очередями, а также количеством и размерами пакетов. Архитектура данного устройства представлена.

Итогом исследования в данной работе стало создание улучшенной архитектуры, в которой конвейерный сетевой процессор применяется в качестве контроллера виртуальных очередей. Важным достоинством данной архитектуры является гибкое управление режимами работы и параметрами алгоритмов QoS. Конвейерный сетевой процессор способен подробно анализировать заголовки входящих пакетов, что может значительно улучшить существующие модели QoS. После проведения



моделирования полученные значения параметров будут проверены в аппаратной реализации данной архитектуры.

Литература

1. Интернет в России в 2022–2023 годах. Состояние, тенденции и перспективы развития // Портал Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. — URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/internet-v-rossii-v-2022-2023-godah.pdf> (дата обращения: 05.03.2024).
2. Yoshigoe Kenji. Design and Evaluation of the Combined Input and Crossbar Queued (CICQ) Switch // USF Tampa Graduate Theses and Dissertations, 2004. URL: <https://digitalcommons.usf.edu/etd/1313> (дата обращения: 15.03.2024).
3. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41. EDN ZUQSZZ.



УДК 004.031.6

Обработка изображений при помощи ПЛИС

Усов Д. А., Манцурова Н. А., Певцов Е. Ф.

МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

duuoosdim@gmail.com

На базе ПЛИС Artu-7 разработано устройство для потоковой обработки изображений в целях выделения контуров при помощи алгоритмов пространственной фильтрации. Разработаны коды поведенческого описания аппаратной обработки изображений, а также ввода-вывода данных через интерфейсы UART и VGA.

Ключевые слова: ПЛИС; обработка изображений; встраиваемые системы; оператор Собеля; UART; VGA.

В настоящее время появляется все больше и больше встраиваемых систем с компьютерным зрением. Все они имеют разное назначение. Однако довольно распространенными являются задачи по выделению контуров, поскольку выделение контуров, точек или границ приводит к уменьшению объема входных данных, что упрощает процедуры анализа изображения [1].

В ходе исследования было разработано устройство по обработке изображений, имеющее следующую структуру: получение данных по UART, запись в BRAM, обработка по алгоритму Собеля, сохранение данных в памяти, вывод через VGA. Методика позволяет одновременно обрабатывать несколько участков изображения, что ускоряет процесс.

Таким образом, были решены следующие задачи: 1) выбран алгоритм работы устройства; 2) разработан код поведенческого описания устройства; 3) реализована передача данных между ПЛИС и компьютером; 4) выполнено тестирование макета. Данный проект может быть использован в зрительных имплантах [3], где изображение формируется при помощи фосфенов, которые в свою очередь генерируются из данных контуров.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005. Рег. № 123052400076-8).

Литература

1. Ханова А. А., Озерова М. И. Обзор методов выделения контуров на изображениях // Информационные технологии в науке и производстве, 2020. — С. 89–92.
2. Маврин Е. М. Сравнение алгоритмов выделения контуров на цифровом изображении и выбор наилучшего алгоритма для реализации на ПЛИС // Вопросы науки и образования, 2019. — № 14 (61). — С. 11–24. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-algoritmov-vydeleniya-konturov-na-tsifrovom-izobrazhenii-i-vybor-nailuchshego-algoritma-dlya-realizatsii-na-plis> (дата обращения: 01.06.2024).
3. Нейроимплант для восстановления зрения: сайт проекта ELVIS V. — URL: <http://elvis-tech.ru/elvisV> (дата обращения: 29.06.2024).



УДК 621.396.6

Методы уменьшения массы радиоэлектронной аппаратуры на этапе моделирования конструкции в САД-системах

Коротков М. Д.¹, д. т. н., Тимошенков С. П.²

¹ АО «НИИ «Субмикрон»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2

Submicron@se.zgrad.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

netadm@miee.ru.

В статье рассматриваются различные методы и подходы к оптимизации конструкции РЭА в целях снижения ее массы. Представлены примеры применения способов уменьшения массы на конкретных примерах, демонстрирующих их эффективность. Особое внимание уделяется методу обнижения конструкции.

Ключевые слова: уменьшение массы; облегчение РЭА; САД-системы; обнижение конструкции; топологическая оптимизация.

Постоянно растущие требования к мобильности и автономности РЭА ведут к необходимости снижения ее массы. Облегчение РЭА позволяет уменьшить энергопотребление, повысить производительность и снизить затраты на транспортировку грузов и космических аппаратов (КА) на орбиту.

Ключевые методы уменьшения массы:

- оптимизация геометрии деталей;
- оптимизация топологии печатных плат (ПП);
- использование более легких и прочных материалов;
- применение более совершенных технологий создания деталей.

Метод оптимизации геометрии деталей позволяет снизить массу РЭА за счет изменения формы и размеров деталей, сохраняя при этом необходимую прочность и функциональность. Он основан на использовании алгоритмов, которые анализируют напряжения и деформации в конструкции, выявляя области, где можно убрать лишний материал без ущерба для прочности. Используется для оптимизации стандартных элементов, уже имеющих определенную форму, например корпусов или ПП [1].

Оптимизация топологии ПП позволяет снизить массу платы, сохраняя при этом ее функциональность и электротехнические характеристики. Метод основан на улучшении трассировки и размещении компонентов в целях минимизации площади и длины проводников, уменьшении толщины ПП. Также одним из способов является создание платы с вырезами или ребрами жесткости, оптимизированными для распределения нагрузки и снижения массы [2–3].

Применение усовершенствованных материалов позволяет напрямую снизить массу РЭА, сохраняя при этом необходимые параметры. Использование материалов с улучшенными механическими свойствами позволяет создавать более прочные конструкции, которые устойчивы к вибрациям, ударам и другим нагрузкам.

Метод использования новых технологий производства деталей позволяет создавать более легкие, прочные и функциональные элементы РЭА по сравнению

с традиционными методами. 3D-печать (аддитивные технологии) позволяет создавать детали сложной геометрии из различных материалов. Уменьшение массы идет за счет создания пустотелых структур, ребер жесткости и других оптимизированных форм, недоступных традиционным методам.

Метод оптимизации геометрии деталей является эффективным инструментом для снижения массы РЭА на этапе проектирования. Использование САД-систем позволяет значительно упростить процесс облегчения конструкции. Правильное применение метода обнижения конструкции в сочетании с другими методами позволяет добиться значительного снижения массы РЭА без ущерба для ее прочности и функциональности [1].

Литература

1. Зеленский В.А., Сухачев К.И. Основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств. — Самара: изд-во Самар. гос. ун-та, 2020. — 146 с.
2. Селиванов Ю.С. Топологическая оптимизация элементов инженерных конструкций // Наука. Технологии. Инновации: Сборник научных трудов XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной Году науки и технологий в России. В 10 частях, Новосибирск, 06–10 декабря 2021 года / Под редакцией Д.О. Соколовой. Часть 10. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021. — С. 70–74.
3. Фролов А.В., Шаповалов П.А., Сигалева П.Н., Смирнов С.В. Уменьшение массы БИНС с применением топологической оптимизации при заданной жесткости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2021. — № 1. — С. 105–117.



УДК 535

Влияние длины последовательности шума, генерируемого оптическим генератором случайных чисел, на эффективность прохождения тестов NIST

Мавков Д. А.¹, Сибгатуллин М. Э.^{1,2}, Гилязов Л. Р.¹, Арсланов Н. М.¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ

420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10

mavkovda@stud.kai.ru

² Государственное научное бюджетное учреждение

«Академия наук Республики Татарстан»

420111, г. Казань, ул. Баумана, 20

Рассмотрено влияние длины последовательности случайных чисел на эффективность прохождения тестов NIST. Случайный шум генерировался оптическим генератором случайных чисел. Увеличение степени случайности достигалось применением схемы выравнивания энергий масштабов вейвлет-преобразования.

Ключевые слова: случайный шум; оптический генератор случайных чисел; тесты NIST.

При генерации случайных чисел необходимо применение математических методов увеличения степени случайности генерируемого шума [1]. Одним из подходов, позволяющих улучшить результаты прохождения тестов на случайность NIST, является применение схемы выравнивания энергий масштабов дискретного вейвлет-преобразования [2]. В данной работе проведены исследования влияния длины выборки генерируемого шума на эффективность прохождения тестов оценки случайности NIST. Последовательность случайных чисел генерировалась разработанным нами аппаратным генератором случайных чисел на основе гомодинного генератора случайного шума. Последовательность анализировалась окнами длиной 300, 500, 700, 1000, 3000, 5000, 7000 и 10000 элементов. Выравнивались энергии масштабов вейвлет-преобразования с 1-го по 3-й, с 1-го по 4-й и с 1-го по 5-й уровни. Было показано, что исследуемая числовая последовательность не проходит тест LinearComplexity при длинах последовательностей ниже 300 элементов. При этом увеличение длины последовательности до 500 элементов приводит к увеличению эффективности прохождения теста выше 90 % при всех комбинациях выравниваемых уровней энергий. Эффективность прохождения теста Rank равна 0 при длинах последовательностей ниже 3000 элементов. Увеличение рассматриваемых значений выше 3000 элементов приводит к значениям эффективности прохождения теста выше 97 %. Таким образом, в зависимости от того, эффективность прохождения каких тестов NIST необходимо увеличить, необходимо подбирать требуемую для этого длину последовательности случайных чисел. Также возможно подобрать такое значение длины последовательности, при котором прохождение отдельных тестов не будет достигать максимального значения, но в среднем по всем тестам будут получены положительные результаты относительно прохождения тестов NIST.

Литература

1. Bikos A., Nastou P., Petroudis G., Stamatou Y. Random Number Generators: Principles and Applications // Cryptography, 2023. Vol. 7. № 4. P. 54–84.
2. Сибгатуллин М. Э., Гилязов Л. Р., Мавков Д. А., Арсланов Н. М. Оптимизация работы генератора случайных чисел на основе InGaAs p-i-n фотодиода в гомодинной схеме с применением дискретного вейвлет-анализа // Изв. РАН. Сер. физ., 2023. — № 87. — № 12. — С. 1796–1801.

УДК 681.518.3

Система сбора данных на основе AVR-микроконтроллера ATmega328 для модернизации аналоговых вакуумметров

Анохин А. Л., к. ф.-м. н., Холодков И. В.

Ивановский государственный химико-технологический университет

153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7

zakat9090@gmail.com

Предложен способ модернизации установки реактивного магнетронного распыления. Разработанная система существенно улучшает метрологические характеристики штатного блока измерения давления и эффективность использования установки в технологическом процессе.

Ключевые слова: микроконтроллер; вакуумметр; автоматизация.

В современных производственных процессах широко применяется вакуумное технологическое оборудование. В ряде случаев при развитии производства нерационально производить полную замену имеющегося оборудования, целесообразнее рассматривать возможность его модернизации. Данное устройство разрабатывалось для установки реактивного магнетронного распыления в целях объединения в единую систему блока контроля состава газовой среды, блока измерения давления на основе вакуумметра ВИТ-3 и системы управления коммутационными элементами установки. Модернизация позволит обеспечить более гибкую возможность автоматизированного управления технологическим процессом.

Основной прототипа выбран микроконтроллер ATmega328 на базе платформы Arduino Nano, для сопряжения которого с термодатчиком вакуумметра ВИТ-3 было принято решение использовать специализированные модули МАХ6675. Визуализация результатов измерений в режиме реального времени обеспечивается использованием цветного TFT-дисплея. К вакуумметру подключаются два модуля МАХ6675, один — для измерения давления, второй — для контроля тока накала. Обмен данными между микроконтроллером и модулем МАХ6675 осуществляется с помощью протокола SPI. Для связи с остальными блоками установки предусмотрено использование последовательной асимметричной шины I²C и прямой связи с цифровыми портами микроконтроллера. Структура предлагаемой системы сбора данных обеспечивает возможность передачи текущих значений контролируемых параметров по шине USB на персональный компьютер, оснащенный специализированным инструментальным ПО. В качестве протокола обмена данными используется протокол UART, а USB-выход устройства работает в режиме виртуального COM-порта. Данные передаются в формате ASCII. Для хранения служебной информации используется EEPROM-память микроконтроллера объемом 1 К, из которой 400 байт отведено для хранения градуировочной зависимости термодатчика манометрического преобразователя. Дополнительно 50 байт использовано для хранения коэффициентов чувствительности для разных газовых сред. Таким образом, для хранения служебной информации, вводимой в систему на этапе настройки, остается доступным достаточный по объему раздел памяти EEPROM микроконтроллера объемом не менее 500 байт. В данном разделе хранятся следующие величины: измеренный номинальный ток накала манометрического преобразователя, выбранный тип единиц измерения давления и установленный поправочный

коэффициент чувствительности. Для программирования микроконтроллера использовалась среда Arduino IDE с набором следующих дополнительных библиотек:

- EEPROM.h для работы с энергонезависимой EEPROM-памятью,
- max6675.h для работы с модулем сопряжения,
- UTFT.h для работы с цветным TFT-дисплеем.

Алгоритм работы системы следующий: после подачи питания происходит инициализация микроконтроллера и считывание служебной информации из EEPROM, далее при отсутствии действий со стороны оператора система переходит в режим измерения. Измеренные значения давления отображаются на цифровом дисплее и параллельно передаются в порт USB. Данные считываются каждые 500 миллисекунд. В процессе измерений предусмотрен выход в режим установки через обработку прерывания, возникающего при нажатии на кнопку на панели управления. В этом случае пользователю предоставляется возможность изменить установленные значения тока накала, коэффициента чувствительности и единицы измерения давления.

Экспериментальная проверка показала, что погрешность измерений давления не превышает 3%. Таким образом, разработанная система позволяет существенно улучшить метрологические характеристики вакуумметра ВИТ-3 и обеспечить его интеграцию в цифровую систему управления установкой.

УДК 621.316.7

Разработка системы управления технологическим оборудованием на базе отечественного программируемого логического контроллера серии «Багет»

Бутманов Д. Д.¹, Голяков М. А.², Гришин А. А.²¹ ООО «Эстика»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, к. 237, кв. 95

dbutmanov@estika.ru

² ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, к. 1

Разрабатывается отечественная система управления на основе ПЛК «Багет», разработанного в ФГУ ФНЦ НИИСИ. Приведены особенности и преимущества ПЛК серии «Багет», а также опыт построения оборудования на базе ПЛК «Багет» в ООО «Эстика». Показаны перспективы развития серии ПЛК «Багет» и проектов, связанных с ним.

Ключевые слова: программируемый логический контроллер; электронная компонентная база; ПЛК «Багет»; «Комдив-МК»; программный аппаратный комплекс.

На сегодняшний день доступность как иностранных систем управления промышленным оборудованием, так и электронной компонентной базы иностранного производства не гарантирована. Для стабильной работы промышленности во время нестабильной политической ситуации ключевые компоненты промышленного оборудования должны разрабатываться и производиться в пределах страны. Системы управления промышленным оборудованием и программируемые логические контроллеры (ПЛК) необходимы для современного производства, а выход их из строя при невозможности закупки комплектующих может надолго парализовать работу линии. По этой причине актуальной задачей является создание системы управления на основе отечественного ПЛК «Багет», в основу которого лег микроконтроллер «Комдив-МК», разработанный в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Использование отечественного микроконтроллера отличает эту серию ПЛК от множества отечественных аналогов.

Специалистами ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН была создана линейка ПЛК «Багет», позволяющая закрыть большую часть потребностей разработчиков оборудования. ПЛК серии «Багет» созданы на основе отечественных платформ, программируются на языках ЭЭК 61131-3, используют операционную систему собственной разработки, прошли сертификацию ТР/ТС по ЭМС, низковольтное оборудование, и могут быть использованы в ответственных производственных системах.

В настоящий момент в ООО «Эстика» на базе АО «НПП «ЭСТО» создается система управления технологическим оборудованием микроэлектронной промышленности, за основу которой взят модульный контроллер «Багет» ПЛК-1. Модульная конструкция позволила полностью повторить функционал блоков управления, ранее разработанных в АО «НПП «ЭСТО», а активное взаимодействие с командой ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН позволяет оперативно решать возникающие в процессе работы сложности, связанные с трудоемкостью написания удобного программного

пакета для конфигурирования и программирования ПЛК. Путем решения этих проблем стало привлечение МПС «СОФТ» к разработке среды исполнения (RT) Master PLC для «Багет» ПЛК1, а также написание управляющей программы в среде MasterSCADA 4D.

В перспективе на базе ПЛК «Багет» будет реализован весь программно-аппаратный комплекс, необходимый для удовлетворения потребностей предприятий микроэлектронной промышленности и критической инфраструктуры. Интеграция в серию ПЛК «Багет» элементов искусственного интеллекта позволит управлять сложными нелинейными процессами, выявлять брак и вести интеллектуальную обработку заготовок. На базе НИУ МИЭТ будут созданы учебные классы и рабочие места для студентов, а освоение ПЛК «Багет» войдет в новейшие магистерские программы.

УДК 621.3

Реализация фильтра Калмана на ПЛИС

Самофалов А. М., Ларионов М. В., Певцов Е. Ф.*МИРЭА — Российский технологический университет**119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78**sasasamofalov82@gmail.com*

На языке Verilog разработан модуль, реализующий обработку данных по алгоритму фильтра Калмана с возможностью проведения тестов как в САПР Vivado, так и при симуляции на отладочной плате. Рассмотрены особенности аппаратной реализации фильтра Калмана для уменьшения шума при обработке изображений.

Ключевые слова: цифровые фильтры; фильтр Калмана; ПЛИС; Vivado; Arty-7.

В настоящее время наряду с важностью развития приборов для получения информации стоит задача разработки инструментов для быстрой и эффективной фильтрации сигналов, их обработки, улучшения качества, а также извлечения нужной информации из шумового фона. Эти функции можно реализовать с помощью применения цифровых фильтров, которые для повышения производительности оптимально реализовывать аппаратно, т.е. на основе программируемых логических интегральных схем.

В данной работе предпринята попытка реализации фильтра Калмана применительно к задачам обработки изображений [1]. На первом этапе на основе модели движения тела по заданной траектории с параметрами шума в ПЛИС реализован простейший фильтр Калмана, который является математическим алгоритмом, созданным для оценивания состояния системы на основе данных датчика и отфильтрованных значений предыдущего шага. Продемонстрирована работоспособность предложенного кода поведенческого описания для аппаратной реализации фильтра Калмана на ПЛИС. В результате проведения тестов как в САПР Vivado, так и при симуляции на отладочной плате показана эффективность разработанного кода поведенческого описания для реализации фильтра на основе интегральной схемы семейства Arty-7. Кроме этого, создан модуль генерации частот для синхронизации обработки данных и модуль, отвечающий за передачу данных при помощи интерфейсов I2C и SPI. При помощи утилиты Serial port plotter и микроконтроллера ESP32 разработана система для считывания информации с ПЛИС в режиме реального времени. Показано, что в результате аппаратной реализации устройства через 15 шагов итерации коэффициент Калмана стабилизировался до значения 0,109, а введенная искусственно за счет имитации шума начальная ошибка модели уменьшилась в четыре раза.

Следующим шагом проекта является разработка кода поведенческого описания устройства для создания малоресурсного прототипа пространственного фильтра изображения как одного из элементов для формирования данных, которые должны использоваться при создании прототипа ИС системы в корпусе как составной части нейроимпланта для восстановления зрения [2]. Но калмановские алгоритмы все еще имеют некоторые проблемы, связанные с размерностью матриц, участвующих при обработке изображений, что значительно замедляет процесс выполнения алгоритмов и увеличивает затрачиваемые ресурсы. Решением

является применение блочной обработки снимков в процессе фильтрации от шумов [3]. Здесь используется принцип параллельного воздействия алгоритмов на разные части изображения, на которые оно поделено заранее. Данная модель учитывает влияние соседних блоков, устраняя негативные эффекты на стыке между ними. В этом случае в обработку информации планируется включить данные из соседних участков, что расширяет вектора состояний и размерность ковариационной матрицы и является более эффективным способом фильтрации по сравнению с обычным калмановским алгоритмом.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ
(государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005.
Рег. № 123052400076-8).*

Литература

1. Истомин Е. П., Каламбет М. В., Колбина О. Н., Сидоренко А. Ю., Яготинцева Н. В. О применении фильтра Калмана при прогнозировании значений параметров природной системы // *Информация и космос*, 2021. — № 2. — С. 106–111.
2. Левицкая О. С., Лебедев М. А. Интерфейс мозг — компьютер: будущее в настоящем // *Вестник Российского государственного медицинского университета*, 2016. — № 2. — С. 4–16.
3. Сирота А. А., Иванков А. Ю. Блочные алгоритмы обработки изображений на основе фильтра Калмана в задаче построения сверхразрешения // *Компьютерная оптика*, 2014. — Т. 38. — № 1. — С. 118–126.



УДК 621.3.049

Разработка уточненного метода оценки надежности систем промышленного Интернета вещей

Цветков В. Э., Ландер Л. Б., к. т. н. Королев П. С.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
vsvetkov@hse.ru*

Проведен обзор и анализ существующих и применяемых на практике подходов к оценке надежности систем промышленного Интернета вещей (IIoT). Разработан уточненный многофакторный метод прогнозирования надежности систем IIoT.

Ключевые слова: IIoT; показатели надежности; аппаратная и программная составляющие; сеть.

Для корректного функционирования систем IIoT нужно постоянно поддерживать высокий уровень их надежности. Однако стоит отметить, что к системам IIoT предъявляются более жесткие требования, чем к устройствам Интернета вещей, применяющихся в бытовой сфере. Это связано с тем, что возникновение отказов какого-либо компонента системы на промышленном предприятии может привести к более серьезным последствиям.

Современные подходы прогнозирования надежности систем IIoT имеют существенный недостаток [1–2]. Они основаны на оценке лишь аппаратной составляющей системы, что делает их недостаточно эффективными. Поэтому цель работы заключается в увеличении точности прогнозирования показателей надежности систем IIoT.

Соответственно, для достижения этой цели был проведен литературный обзор используемых на практике подходов, позволяющих оценить надежность всей системы IIoT. Кроме того, были исследованы математические методы оценки программного обеспечения, технической составляющей и сетевой части системы. Далее был разработан собственный подход к многофакторному прогнозированию показателей надежности IIoT-системы, который учитывает все эти три составляющие.

Литература

1. Надежность электрорадиоизделий: Справочник. — М.: МО РФ, 2006. — 641 с.
2. Pokorni S. J. Reliability and availability of the internet of things // *Vojnotehnički glasnik: military technical courier*. Vol. 67. Issue 3. P. 588–600.



УДК 621.383

Численное исследование оптического диода на основе двумерных фотонных кристаллов

Мокшин П. В.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва
443086, г. Самара, Московское ш., 34
mokshinfabio@gmail.com*

Численно исследован оптический диод, разработанный на основе стыковки двумерных фотонно-кристаллических волноводов различной структуры.

Ключевые слова: фотонный кристалл; оптический диод; интегральная оптика.

Разработка элементной базы оптических вычислительных систем на основе двумерных фотонных кристаллов (ФК) позволяет создавать интегральные оптические устройства обработки информации, обладающие следующими преимуществами:

- высокое быстродействие [1];
- технологичность (возможность реализации имеющимися технологиями микроэлектроники);
- радиационная стойкость [2].

Различные варианты стыковки двух ФК волноводных структур открывают новые возможности создания таких элементов, как оптические диоды (устройства, обладающие существенно разными коэффициентами пропускания при прохождении света в прямом и обратном направлении) [3]. В работе численно исследовались стыковки двух ФК-волноводов с различным характером распространения излучения. Из множества конфигураций стыковок выбиралась оптимальная с точки зрения пропускания. Каждый из ФК-волноводов, сформированный упорядоченным набором воздушных отверстий в массиве кремния, характеризуется радиусом одного стержня и взаимным расположением отверстий. В ходе вычислительных экспериментов, проведенных с использованием пакета Ansys Lumerical (реализующего FDTD-метод), продемонстрировано пропускание с коэффициентом 0,35 в одном направлении и коэффициентом 0,006 в другом, что свидетельствует о возможности использования найденной структуры в качестве оптического диода.

Литература

1. Derdour R., Lebbal M. R., Mouetsi S., Hicini A. A novel connected structure of all-optical high speed and ultra-compact photonic crystal OR logic gate // Journal of Optical Communications, 2021. 152.
2. Shiue R. J., Gao Y., Tan C. et al. Thermal radiation control from hot graphene electrons coupled to a photonic crystal nanocavity // Nat. Commun., 2019. № 10. P. 109.
3. Патент RU2819193C1, Мокшин П. В., Павельев В. С., Головашкин Д. Л. Оптический диод на двумерных фотонных кристаллах. — МПК G02F1/00 G02B6/00.

УДК 621.372.8

Исследование и анализ нелинейно-оптических эффектов в кремниевых щелевых волноводных структурах

Мурзагалина С. М.^{1,2}, Барабаненков М. Ю.^{1,2,3}¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ Институт проблем технологии микроэлектроники

и особых материалов РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

murzagalina.sm@phystech.edu

Работа посвящена исследованию нелинейных оптических явлений в щелевых кремниевых волноводах, а также в кремнийорганических полимерных структурах. Продемонстрировано уменьшение потерь оптической мощности за счет компенсации ограничений, налагаемых двухфотонным поглощением в кремнии. Построенная модель щелевого волновода анализируется с использованием следующих вычислительных методов: метода конечных элементов (МКЭ), метода конечных разностей во временной области (FDTD), а также метода сингулярных возмущений (SPT).

Ключевые слова: нелинейная оптика; легированные полимеры; щелевой волновод.

Кремниевая технологическая база является универсальной как для электронных устройств, так и для интегральных фотонных решений. Она незаменима для таких развивающихся высокотехнологичных областей, как индустрия телекоммуникаций и системы обработки данных. На платформе КНИ было разработано множество устройств, в основе работы которых лежат эффекты линейной оптики, например оптические буферы, межсоединения [1], а также различные неинвазивные датчики.

Однако при высоких значениях интенсивности излучения (порядка ГВт/см²) в кремниевых структурах начинают проявляться нелинейные оптические эффекты. Многие из них, например четырехволновое смещение или самомодуляцию, можно использовать для различных приложений и потребностей интегральной фотоники, в том числе для мультиплексирования сигналов и их модуляции. В то же время двухфотонное поглощение (ДФП) в кремнии приводит к большим потерям оптической мощности, что может исключить указанные ранее преимущества.

Ввиду центральной симметрии кристаллической структуры кремния нелинейные эффекты второго порядка не проявляются в объеме структуры, а за счет влияния ДФП и инициированного им поглощения на свободных носителях, ослабляющих распространяемый в структуре сигнал, слабо выражены эффекты третьего порядка нелинейности. Для решения этой проблемы был проведен анализ различных материалов, результаты которого представлены в табл. 1. В том числе были рассмотрены кремнийорганические гибриды (КОГ), которые обладают сильными нелинейностями второго и третьего порядка [2]. На распространение оптического



излучения в волноводных структурах влияют как свойства кремния, так и КОГ-материалов [3].

Таблица 1. Обзор анализируемых материалов и их нелинейные характеристики

Нелинейные характеристики материалов					
Материал	n_L	n_{NL} [м ² /Вт]	$n_{complex}$	β_{NL}	FOM
Si	3,48	$6*10^{-18}$	3,54	1,72%	0,86
SiO ₂	1,46	$2,5*10^{-20}$	1,46	0,02%	10
As ₄₀ Se ₆₀	2,81	$2,3*10^{-17}$	3,04	8,19%	11
Ormocore	1,7	$2*10^{-17}$	1,9	11,76%	6,4

Здесь n_L — линейный показатель преломления исследуемого материала, а n_{NL} — нелинейная составляющая полного показателя преломления $n_{complex}$, которая связана с восприимчивостью третьего порядка $\chi^{(3)}$ следующим образом:

$$n_{NL} = \text{Re}(\chi^{(3)}) / (4\epsilon_0 c n_L^2),$$

где ϵ_0 и c — диэлектрическая проницаемость и скорость света в вакууме соответственно. Для полимераOrmocore нелинейный показатель преломления на порядок выше n_{NL} кремния, в то время как общий показатель преломления значительно меньше, что способствует созданию достаточной контрастности для локализации электромагнитного поля в малом поперечном сечении.

Двухфотонное поглощение и поглощение на свободных носителях приводят к значительным потерям оптической мощности. Таким образом, для увеличения эффективности устройства необходимо снизить влияние этих эффектов. Наглядно это демонстрирует функция годности (FOM), связывающая нелинейный фазовый сдвиг с соответствующим поглощением интенсивности и определяющаяся как

$$FOM = \frac{1}{\lambda} \frac{n_{NL}}{\alpha_{NL}},$$

здесь $\alpha_{NL}(\lambda)$ — коэффициент нелинейного поглощения. Для кремния характерен как высокий нелинейный показатель преломления n_{NL} , так и высокий коэффициент поглощения, обусловленный двухфотонным поглощением в объеме структуры, таким образом, значение FOM для Si невелико. Диоксид кремния SiO₂ обладает слабыми нелинейными характеристиками, в то время как полимерOrmocore характеризуется большим n_{NL} и небольшим нелинейным коэффициентом поглощения α_{NL} , что приводит к увеличению FOM и усилению нелинейного отклика в структуре.

Еще одной значимой характеристикой является параметр нелинейности, который определяется как

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_{NL}}{A_{eff}^{(3)}}.$$

Чтобы получить максимальную нелинейность в щелевых волноводных структурах, необходимо не только найти материал с высоким нелинейным показателем преломления, но и добиться максимальной локализации поля в щели структуры. Параметр нелинейности γ обратно пропорционален эффективной области

нелинейных взаимодействий третьего порядка $A_{eff}^{(3)}$. Для структуры кремниевого щелевого волновода на рис. 1а $A_{eff}^{(3)}$ меньше $0,1 \text{ мкм}^2$ может быть получена при таких геометрических параметрах, как ширина щели 50 нм, ширина направляющих волноводов 200 нм и их высота 400 нм.

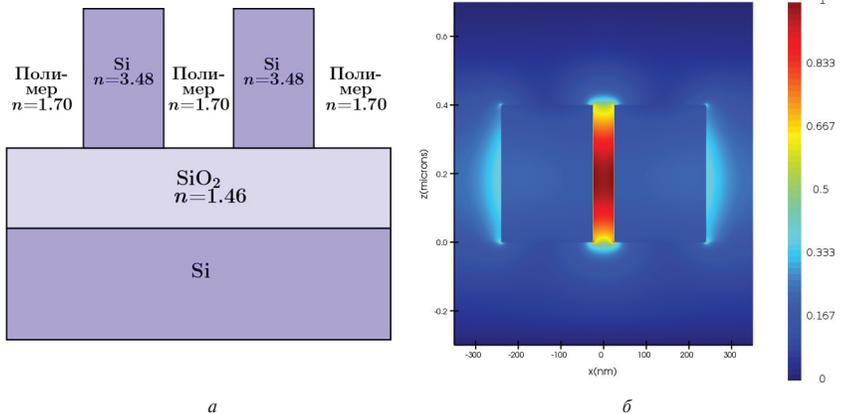


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения щелевого волновода на основе КНИ-структуры (а) и 2D-визуализация результатов численного моделирования распределения волноводной моды (б)

Уникальное преимущество щелевой волноводной структуры заключается в том, что поле локализуется внутри щели, как показано на рис. 1б, так что нелинейный отклик в кремнии становится менее значимым, а нелинейные эффекты проявляются в материале, заполняющем пространство между кремниевыми волноводами, в качестве которого могут быть выбраны легированные полимеры или другие органические вещества, например полимер Optosoge, в которых демонстрируются нелинейности как второго, так и третьего порядка. Щелевые волноводные структуры являются хорошими кандидатами для электрооптических модуляторов с высокими скоростями передачи данных и устройств обработки оптических сигналов [4]. Исследуемые устройства обладают такими преимуществами, как высокая эффективность и интеграция с КМОП-технологиями.

Нелинейный фазовый сдвиг в щелевом волноводе обусловлен нелинейно-оптическим эффектом Керра. Выполнен анализ исследуемой структуры с помощью программного обеспечения для моделирования, основанного на методе конечных элементов (МКЭ) и методе конечных разностей во временной области (FDTD). Также разработан аналитический подход к получению параметров щелевого волновода с нелинейными характеристиками на основе метода сингулярных возмущений (SPT). SPT необходим для анализа нелинейного отклика в структуре как малого пространственного возмущения [5], что позволяет построить модель с достаточно высокой точностью [6].

В ходе исследования было проведено моделирование распространения излучения в щелевом волноводе, по результатам которого выявлено распределение полей



в зависимости от характеристик источника и геометрических параметров структуры. Также было получено значение минимальной эффективной площади нелинейного взаимодействия, которое необходимо для оптимизации геометрических параметров щелевого волновода, увеличивая тем самым функцию годности FOM устройства.

Кроме того, построена оптимизационная модель на основе генетического алгоритма [7] в целях снижения потерь оптической мощности сигнала за счет определения оптимальной комбинации геометрических характеристик структуры для достижения максимальной эффективности устройства. С помощью оптимизации удалось сократить потери оптической мощности в щелевом волноводе в пять раз.

Таким образом, проведенное с помощью математического моделирования исследование позволяет проанализировать характер распространения излучения в структуре щелевого волновода и предложить оптимальную геометрию для усиления нелинейного отклика при минимальных потерях мощности.

Литература

1. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристалльных и межкристалльных межсоединений современных СБИС // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
2. Leuthold J. et al. Silicon Organic Hybrid Technology—A Platform for Practical Non-linear Optics // Proceedings of the IEEE, 2009. Vol. 97. № 7. P. 1304–1316. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2016849.
3. Lipson M. et al. Guiding, modulatin. and emitting light on Silicon-challenges and opportunities // Journal of Lightwave Technology, 2005. Vol. 23. № 12. P. 4222–4238. DOI: 10.1109/JLT.2005.858225.
4. Palmer R. et al. Low power Mach—Zehnder modulator in silicon-organic hybrid technology // IEEE Photonics Technology Letters, 2013. Vol. 25. № 13. P. 1226–1229.
5. Nayfeh A. H., Asfar O. R. Parallel-plate waveguide with sinusoidally perturbed boundaries // Journal of Applied Physics, 1974. Vol. 45. № 11. P. 4797–4800.
6. Yokota M. et al. Guided transverse-magnetic waves supported by a weakly nonlinear slab waveguide // JOSA B, 1993. Vol. 10. № 6. P. 1096–1101.
7. Koza J. R. Genetic programming as a means for programming computers by natural selection // Statistics and computing, 1994. Vol. 4. P. 87–112.

УДК 538.958

Управление оптическим излучением наноструктур GeSiSn/Si при помощи металлических наноантенн

Хахулин С. А.¹, Коляда Д. В.¹, Фирсов Д. Д.¹, Комков О. С.¹, Тимофеев В. А.², Скворцов И. В.², Машанов В. И.², Гайдук А. Е.², Уткин Д. Е.^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф

² Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

³ Новосибирский государственный университет

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Определены положения мод локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массивах алюминиевых наноантенн, сформированных на поверхности излучающих гетероструктур GeSiSn/Si. Показано, как наличие наноантенн различной конфигурации влияет на интенсивность оптического излучения GeSiSn/Si.

Ключевые слова: гетероструктуры; локализованный поверхностный плазмонный резонанс; GeSiSn; анизотропное отражение; фотолюминесценция.

Под воздействием электромагнитного излучения свободные электроны в металлических наночастицах приобретают осциллирующее движение, что при определенной энергии приводит к появлению в наночастицах локализованного поверхностного плазмонного резонанса (*localized surface plasmon resonance* — *LSPR*). Такой резонанс приводит к появлению сильного электрического поля, локализованного вблизи наночастиц, что широко используется для усиления комбинационного рассеяния, ускорения химических реакций и т. д. [1]. Такие частицы также называются оптическими наноантеннами, поскольку при помощи них можно в разы усиливать слабые оптические сигналы [2]. Это свойство позволяет управлять оптическим излучением, достигая необходимого уровня его интенсивности.

В данной работе на поверхности излучающих множественных квантовых ям $\text{Ge}_{0,84}\text{Si}_{0,076}\text{Sn}_{0,084}/\text{Si}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, были сформированы массивы прямоугольных алюминиевых наноантенн толщиной 50 нм с различными латеральными размерами L и S . Оптические свойства полученных наноантенн были охарактеризованы методом ИК Фурье-спектроскопии анизотропного отражения [3], где осуществлялась модуляция направления линейной поляризации зондового излучения в плоскости поверхности образцов вдоль длинной L и короткой S сторон. Благодаря этому на фоне всего отраженного излучения были выделены поляризационно-зависимые участки спектров, связанные с наличием *LSPR*. Создание наноантенн прямоугольной формы приводит к тому, что вдоль сторон наноантенн L и S возбуждаются резонансные моды *LSPR* с различным спектральным положением [4]. Вдоль длинной стороны возбуждается резонансная мода относительно большей интенсивности, и при увеличении длины L от 200 нм (массив № 1) до 360 нм (массив № 3) нами было показано, что интенсивность растет в несколько раз со сдвигом энергии резонанса от 1 до 0,66 эВ. Вдоль короткой стороны S с размерами от 140 нм (массив № 1) до 157 нм (массив № 3) было



определено наличие резонанса в районе 1,1–1,2 эВ, интенсивность которого на порядки меньше по сравнению со стороной L во всей серии образцов.

Влияние алюминиевых наноантенн на оптическое излучение структуры $\text{Ge}_{0,84}\text{Si}_{0,076}\text{Sn}_{0,084}/\text{Si}$ было исследовано методом низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ). В спектре ФЛ $\text{Ge}_{0,84}\text{Si}_{0,076}\text{Sn}_{0,084}/\text{Si}$ наблюдается сигнал вблизи 0,66 эВ, связанный с межзонной рекомбинацией носителей заряда. Использование массива наноантенн № 1, диапазон резонанса которого не пересекается с диапазоном сигнала ФЛ, ожидаемо не приводит к усилению излучения. Другой массив наноантенн № 2 ($L = 265$ нм, $S = 147$ нм) с пиком резонанса вблизи 0,75 эВ имеет ненулевое значение $LSPR$ в области излучения гетероструктур, в результате чего наблюдается усиление ФЛ. Формирование поверх множественных квантовых ям третьего массива № 3, чей диапазон и пик резонанса совпадают с аналогичными значениями сигнала излучения гетероструктуры, приводит к двукратному усилению сигнала ФЛ. Кроме того, в случае массивов плазмонных наноантенн № 2 и № 3, помимо заметного усиления ФЛ, наблюдается ее частичная поляризация, чего не было получено в случае плазмонного массива № 1, не взаимодействующего с излучением гетероструктуры.

Таким образом, в работе определены спектральные особенности локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массивах алюминиевых наноантенн на поверхности излучающей гетероструктуры $\text{Ge}_{0,84}\text{Si}_{0,076}\text{Sn}_{0,084}/\text{Si}$. Получено усиление фотолюминесценции и ее частичная поляризация в результате взаимодействия гетероструктуры с наноантеннами, чей плазмонный резонанс полностью либо частично совпадает с диапазоном излучения множественных квантовых ям.

Литература

1. Hutter E., Fendler J. H. Exploitation of localized surface plasmon resonance // *Advanced Materials*, 2004. Vol. 16. № 19. P. 1685–1706.
2. Ma L., Yu P., Wang W., Kuo H. C., Govorov A. O., Sun S., Wang Z. Nanoantenna-enhanced light-emitting diodes: Fundamental and recent progress // *Laser & Photonics Reviews*, 2021. Vol. 15. № 5. P. 20000367.
3. Firsov D. D., Khakhulin S. A., Komkov O. S. Fourier Transform Infrared Reflection Anisotropy Spectroscopy of Semiconductor Crystals and Structures: Development and Application in the Mid-Infrared // *Applied Spectroscopy*, 2023. Vol. 77. № 5. P. 470–481.
4. Lecarme O., Sun Q., Ueno K., Misawa H. Robust and versatile light absorption at near-infrared wavelengths by plasmonic aluminum nanorods // *ACS Photonics*, 2014. Vol. 1. № 6. P. 538–546.

УДК 621.383

Разработка модели интегрального фотонного чувствительного элемента с применением углеродных нанотрубок**Митрофанова А. Е.^{1,2}, Барабаненков М. Ю.², Светиков В. В.^{3,4}, Ромашкин А. В.⁵**

¹ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
mitrofanova.ae@phystech.edu*

² *АО «НИИМЭ»*

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

³ *АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»*

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

⁴ *Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН*

119991, ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, 38

⁵ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе исследовано поведение карбоксилированных углеродных нанотрубок при адсорбции газов. Выбран оптимальный тип волноводной структуры, произведена оценка необходимой длины чувствительного участка сенсора. Разработана модель чувствительного элемента на основе интерферометра Маха — Цендера.

Ключевые слова: газовый сенсор; углеродные нанотрубки; интегральная фотоника.

В настоящее время газовые сенсоры широко применяются, например, для мониторинга состояния окружающей среды и отслеживания состояния воздуха в производственных помещениях. Повышение селективности и точности фотонных интегральных чувствительных элементов достигается за счет использования наноматериалов [1]. Материалы на основе углерода широко применяются при разработке газовых датчиков из-за своих электрических свойств, которые значительно изменяются при взаимодействии с молекулами газов [2, 3].

Несмотря на активное изучение изменения свойств графена при адсорбции газа, исследований, рассматривающих свойства функционализированных углеродных нанотрубок и возможности их применения для мониторинга газовых сред, крайне мало. Целью данной работы является анализ изменения свойств карбоксилированных углеродных нанотрубок при взаимодействии с аммиаком и исследование возможности создания газового сенсора.

Наиболее распространенным методом создания фотонного сенсора является модификация оптического волокна графеном [2], оксидом графена [3] или слоем углеродных нанотрубок. Массив сенсоров [4] позволяет использовать один датчик, сочетающий различные чувствительные элементы, для анализа смесей газов и выделения отдельных составляющих и их концентраций.

В работе исследовались слои карбоксилированных углеродных нанотрубок (P3-SWNT) толщиной 3, 18,5 и 35 нм. На рис. 1 [5] представлено АСМ-изображение слоя карбоксилированных углеродных нанотрубок. Показатели преломления



тонких слоев, использовавшиеся в дальнейшем для моделирования чувствительного элемента, были получены с помощью эллипсометра.

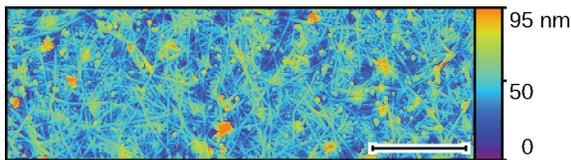


Рис. 1. АСМ-изображение слоя углеродных нанотрубок, цветом выделена толщина слоя (от 0 до 95 нм)

Для разработки элемента был выбран SiON-волновод с повышенной контрастностью ($n = 1,82$) шириной 1 мкм и толщиной 0,6 мкм. Нанесение на поверхность такого волновода тонкого (35 нм) слоя карбоксилированных УНТ позволяет значительно увеличить чувствительность структуры к аммиаку.

В работе представлена модель чувствительного элемента на основе интерферометра Маха—Цендера (ИМЦ). Для функционирования такого элемента необходимо наличие поворота фазы на $\pi/2$ между плечами ИМЦ. Участки со слоем УНТ располагаются в обоих плечах ИМЦ, поворот фазы оценивается между плечом, находящимся при нормальных условиях, и плечом, подверженным воздействию аммиака. Длина участка, необходимая для получения поворота фазы на $\pi/2$ при длине волны $\lambda = 1319$ нм, составляет порядка 13 мм.

На рис. 2 представлена полученная с помощью моделирования зависимость интенсивности в выходном канале от содержания паров воды в азотной среде. Зависимость соответствует описанному в [4] поведению отклика ИМЦ. Для более точной оценки требуется уточнение экспериментальных данных.

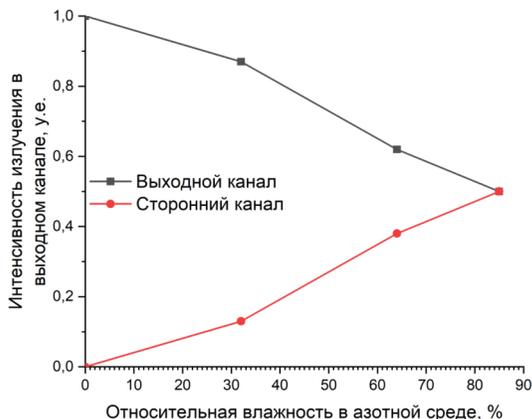


Рис. 2. Зависимость интенсивности выходящего излучения от концентрации паров воды в азотной среде



Общая длина чувствительного элемента составляет около 35 мм. Для дальнейшей миниатюризации необходимо использование более контрастных волноводов (Si_3N_4 и Si).

Литература

1. Бокарев В. П., Красников Г. Я. Оценка изменения физико-химических свойств наноразмерных кристаллических материалов // Доклады Академии наук, 2008. — Т. 420. — № 2. — С. 186–189.
2. Yao B. et al. All-optical Mach–Zehnder interferometric NH_3 gas sensor based on graphene/microfiber hybrid waveguide // Sensors and Actuators B: Chemical, 2014. Vol. 194. P. 142–148.
3. Fan X. et al. Ammonia gas sensor based on graphene oxide-coated mach-zehnder interferometer with hybrid fiber structure // Sensors, 2021. 11. Vol. 21.
4. Laplatine L. et al. Silicon photonic olfactory sensor based on an array of 64 bio-functionalized Mach-Zehnder interferometers // Optics Express, 2022. 19. Vol. 30. P. 33955–33968.
5. Romashkin A. V. et al. Change in the carbon nanotube thin layer refractive index after water and ammonia // Book of Abstracts. 11th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, 2024. P. 537–538.



УДК 538.945

Формирование сверхпроводящих пленок Nb₃Al для интегрального однофотонного детектора в планарных ионных ловушках

Хыдырова С. Ю.^{1,2}, Ломакин А. И.^{3,4}, Ковалюк В. В.^{2,3}, к. ф.-м. н.,
Гольцман Г. Н.^{4,5}, д. ф.-м. н., Моисеев К. М.¹, к. т. н.

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
hydyrova@bmstu.ru

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)
109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11

⁴ Московский педагогический государственный университет
119435, г. Москва, ул. Малая Пироговская, 1, стр. 1

⁵ Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1

Получены сверхпроводящие тонкие пленки Nb-Al методом совместного магнетронного распыления из двух источников. Исследована зависимость их удельного сопротивления и критической температуры от мощности магнетронов и температуры подложки.

Ключевые слова: интегральный однофотонный детектор; SNSPD; планарная ионная ловушка; сверхпроводимость; Nb₃Al; критическая температура; тонкая пленка; магнетронное распыление.

В планарных ионных ловушках, работающих преимущественно при температурах ~4 К и выше, необходимы интегральные однофотонные детекторы с высокой квантовой эффективностью и низкой скоростью темного счета, в связи с чем актуальной является разработка интегрального однофотонного детектора на основе тонких сверхпроводящих пленок с более высокой критической температурой T_C по сравнению с широко применяемыми NbN. Ранее нами было показано, что перспективными материалами для SNSPD являются кристаллические сверхпроводники класса A15, среди которых одним из наиболее актуальных и малоисследованных является Nb₃Al [1], формирование сверхпроводящих тонких пленок которого возможно совместным магнетронным распылением [2].

В данной работе пленки Nb-Al формируются на установке ВУП-11М совместным магнетронным распылением из двух источников при температуре подложки от комнатной до ~600 °С и при различной мощности магнетронов: для Nb — от 150 до 550 Вт и для Al — от 44 до 162 Вт.

Показано, что удельное сопротивление пленок Nb-Al заметно снижается от 337 до 157 мкОм·см при повышении скорости роста пленки от 2,8 до 9,8 Å/с (для мощности магнетрона Nb от 150 до 550 Вт соответственно). Выявлено, что для пленок толщиной 350 нм с долей Nb 80 % (ат.), осаждаемых без нагрева подложки, критическая температура составляет $T_C = 3,5$ К. В результате отжига в течение 6 ч

при температуре 600 °С в высоком вакууме поверхностное сопротивление пленок значительно снижается, а также заметно образование зерен, что свидетельствует о кристаллизации структуры пленки и повышении ее сверхпроводящих свойств.

Литература

1. Ковалюк В. В. и др. Волноводный сверхпроводниковый однофотонный детектор для фотонного и ионного квантовых процессоров и нейроморфных вычислений // Изв. вузов. Радиофизика, 2023. — Т. 66. — № 11. — С. 927–985.
2. Dochev D. et al. Nb₃Al thin film deposition for low-noise terahertz electronics // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2008. Vol. 97. № 1. P. 012072.



УДК 535-45; 621.376; 535.015

Методы оценки поляризационно-зависимых характеристик электрооптических модуляторов на платформе из нитрида кремния

Амирасланов А. Ш.¹, Бабуринов А. С.^{1,2}, Лотков Е. С.^{1,2}, Авдеев С. С.^{1,2},
Бузаверов К. А.^{1,2}, Родионов И. А.^{1,2}

¹ НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18

² ВНИИА им. Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22

Разработаны электрооптический модулятор и конвертер поляризации на платформе из нитрида кремния. Описаны методы оценки поляризационно-зависимых характеристик электрооптических модуляторов и пассивных элементов фотонных интегральных схем. Представлены результаты измерений параметров устройств при разных входных поляризациях.

Ключевые слова: электрооптический модулятор; гибридная мода; нитрид кремния; поляризационный конвертер.

Интегральная фотоника является одной из критически важных областей для решения задач квантовых [1] и нейроморфных [2] вычислений, центров обработки информации [3] и систем компьютерного зрения [4] благодаря своей высокой пропускной способности и низкому энергопотреблению.

Электрооптические модуляторы являются перспективными устройствами управления светом на чипе, которые способны достигать гигагерцевой полосы пропускания [5]. Они находят свое применение в системах с криогенными температурами [6, 7] и малыми размерами [8]. В настоящее время ведутся поиски оптимального сочетания параметров модуляторов, а именно высокой плотности интеграции, низких потерь, возможности переключения фазы и высокого коэффициента экстинкции. Электрооптические модуляторы на основе возбуждения гибридной оптической моды представляют собой один из возможных вариантов компромиссного решения, поскольку они обладают как малыми размерами и высокой полосой пропускания (как частично плазмонный компонент), так и малыми вносимыми потерями (как частично фотонный компонент) [9]. Для возбуждения гибридной моды в области разрабатываемого активного элемента требуется определенная поляризация света, в связи с чем возникает необходимость в контроле поляризации света на чипе.

В рамках работ по созданию электрооптического модулятора были разработаны:

- конструкция электрооптического модулятора на основе гибридной оптической моды;
- конструкция волноводов из нитрида кремния для поддержания фундаментальных ТЕ- и ТМ-мод;
- конструкция конвертера поляризации для преобразования фундаментальной ТЕ-моды в фундаментальную ТМ-моду;

- измерительные схемы определения поляризационно-зависимых характеристик электрооптического модулятора.

Работы выполнялись сотрудниками научно-образовательного центра «Функциональные Микро/Наносистемы».

Литература

1. Taballione C., Anguita M., Goede M., Venderbosch P., Kassenberg B., Snijders H., Kannan N., Vleeshouwers W., Smith D., Epping J., Meer R., Pinkse P., Vlekkert H., Renema J. 20-Mode Universal Quantum Photonic Processor. *Quantum* (2023). 7. 1071. [10.22331/q-2023-08-01-1071](https://doi.org/10.22331/q-2023-08-01-1071).
2. Zhang Q., Xing Z., Huang D. Implementation of Pruned Backpropagation Neural Network Based on Photonic Integrated Circuits // *Photonics*, 2021. 8, 363. URL: <https://doi.org/10.3390/photonics8090363>.
3. Near Margalit, Chao Xiang, Bowers S. M., Bjorlin A., Blum R., Bowers J. E. Perspective on the future of silicon photonics and electronics // *Appl. Phys. Lett.*, 31 May 2021. 118 (22): 220501. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0050117>.
4. Poulton C., Byrd M., Raval M., Su Zhan, Li Nanxi, Timurdogan E., Coolbaugh D., Vermeulen D., Watts M. R. Large-scale silicon nitride nanophotonic phased arrays at infrared and visible wavelengths // *Optics Letters*, 2016. 42. 21–24. [10.1364/OL.42.000021](https://doi.org/10.1364/OL.42.000021).
5. Eppenberger M., Messner A., Bitachon B. I. et al. Resonant plasmonic micro-racetrack modulators with high bandwidth and high temperature tolerance // *Nat. Photon.* 17, 360–367 (2023). URL: <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01161-9>.
6. Youssefi A., Shomroni I., Joshi Y. J. et al. A cryogenic electro-optic interconnect for superconducting devices // *Nat Electron* 4, 326–332 (2021). URL: <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00570-4>.
7. Michael Gehl, Christopher Long, Doug Trotter, Andrew Starbuck, Andrew Pomerene, Jeremy B. Wright, Seth Melgaard, John Sirola, Anthony L. Lentin, and Christopher DeRose. Operation of high-speed silicon photonic micro-disk modulators at cryogenic temperatures // *Optica* 4, 374–382 (2017).
8. Erwen Li, Qian Gao, Ray T. Che. and Alan X. Wang. Ultracompact Silicon-Conductive Oxide Nanocavity Modulator with 0.02 Lambda-Cubic Active Volume // *Nano Letters* 2018 18 (2), 1075–1081. DOI: [10.1021/acs.nanolett.7b04588](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b04588).
9. Andreas Messner, David Moor, Daniel Chelladurai, Roman Svoboda, Jasmin Smajic, Juerg Leuthold. Plasmonic, photonic, or hybrid? Reviewing waveguide geometries for electro-optic modulators. *APL Photonics* 1 October 2023; 8 (10): 100901. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0159166>.



УДК 621.3.049

Вычислительная сложность программирования фотонных интегральных схем, построенных на базе интерферометра Маха — Цендера

Суроегина А. Е.^{1,2}, к. ф.-м. н., Барабаш Н. В.^{1,2}, к. ф.-м. н., Бобров А. И.¹¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

suroegina@unn.ru

² Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

В литературе большое внимание уделено топологиям и производительности фотонных интегральных схем (ФИС), выполняющих матрично-векторное умножение. В нашем докладе рассматривается существенный вопрос о вычислительной сложности программирования ФИС, который значительно реже встречается в литературе.

Ключевые слова: унитарное разложение; интерферометр; ФИС.

Применение фотонных интегральных схем (ФИС) считается перспективным решением для преодоления ограничений традиционной электронной вычислительной техники. В научных публикациях широко освещены топологии и эффективность ФИС, выполняющих матрично-векторное умножение. Однако вопрос о сложности программирования таких схем, являющийся ключевым при их разработке и определении сферы применения, остается малоизученным. В нашем докладе этот вопрос рассмотрен для двух методов построения топологии ФИС и их программирования.

В работе [1] было показано, что любой дискретный конечномерный унитарный оператор может быть физически реализован с помощью оптических устройств. Там же был приведен алгоритм разложения любой унитарной $N \times N$ -матрицы $U(N)$ в последовательность двумерных преобразований:

$$U(N) = D \cdot T_{2,1} \cdot \dots \cdot T_{N,N-2} \cdot T_{N,N-1},$$

где D — диагональная матрица с единичными по модулю элементами, а $T_{N,M}$ — блочно-диагональная матрица, соответствующая интерферометру Маха — Цендера. Блок матрицы $T_{N,M}$ имеет вид $P(\varphi, \theta) = \begin{pmatrix} e^{i\varphi} \cos \theta & -\sin \theta \\ e^{i\varphi} \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ и занимает элементы с индексами (N, N) , (N, M) , (M, N) и (M, M) . Ее другие диагональные элементы равны единице, а все остальные — нулю.

Другой известный алгоритм [2] позволяет представить унитарную матрицу в виде произведения D и матриц $T_{N,M}$ и $T_{N,M}^{-1}$, домножение на которые происходит поочередно с обеих сторон от D . Прямоугольная топология ФИС, соответствующая такой композиции, отличается от треугольной топологии [1] более компактным расположением светоделителей и фазовращателей. По сравнению с треугольной, она имеет вдвое меньшую оптическую глубину и более устойчива к потерям.

В нашей работе даны оценки вычислительной сложности обоих методов, а также показано, что для действительных унитарных матриц достаточно использовать



блочно-диагональную матрицу с блоком вида $P(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$. Использование такого блока упрощает реализацию интерферометра за счет уменьшения количества фазовращателей.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007.

Литература

1. Reck M., Zeilinger A., Bernstein H. J. and Bertani P. Experimental realization of any discrete unitary operator // Phys. Rev. Lett., 1994. 73, 58–61.
2. Clements W. R. et al. Optimal design for universal multiport interferometers // Optica 3, 1460–1465 (2016). Vol. 16. № 6 (2). P. 632–639.



УДК 621.383

Оценки точности вычислений на фотонной интегральной схеме, построенной на базе неидеальных интерферометров Маха — Цендера

к. ф.-м. н., Барабаш Н. В.^{1,2}, Сидоренко К. В.¹, к. ф.-м. н., Нежданов А. В.¹,
к. ф.-м. н., Бобров А. И.¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
barbash@itmm.unn.ru

² Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

Рассматриваются оценки точности матрично-векторного умножения, выполненного на планарном интерферометре Маха — Цендера с потерями и несимметричными светоделителями. Полученные оценки могут использоваться при проектировании фотонных интегральных схем и определении требований к качеству их изготовления.

Ключевые слова: интерферометр Маха — Цендера; матрично-векторное умножение; ошибки изготовления; фотоника; ФИС.

Ежедневно в мире производится около нескольких эксабайт (10^{18}) данных с экспоненциально растущей скоростью [1], что требует увеличения производительности компьютеров. Этот процесс имеет аппаратные ограничения, обойти которые сегодня предлагается с помощью использования оптических фотонных интегральных схем (ФИС) при проектировании традиционных процессоров. ФИС позволяет выполнять сверхбыстрые матрично-векторные операции, используемые, например, в задачах машинного обучения и современных телекоммуникационных стандартах [2, 3]. Такие операции реализуются путем пропускания упорядоченного набора оптических сигналов через многослойную оптическую сеть, образованную каскадами планарных интерферометров Маха — Цендера (ИМЦ) [4]. Физически роль вектора играет набор входных мод, а действию линейного матричного оператора соответствуют фазовые сдвиги и перераспределение интенсивностей оптических сигналов на интерферометрах.

Основными препятствиями для масштабирования оптических сетей являются неточности изготовления, оптические потери, рассеяние на шероховатости боковых стенок, а также ограниченная точность цифроаналогового преобразования при управлении фазовращателями [5]. В нашей работе рассматривается ИМЦ, направленные ответвители которого имеют ошибки деления из-за неточности соблюдения расстояния между волноводами и длины взаимодействия [6]. Для такого интерферометра с использованием величины вектора ошибки получены оценки точности вычисления в зависимости от ошибки деления. Теоретические результаты были проверены в численном эксперименте, а именно для построенной в COMSOL Multiphysics модели неидеального ИМЦ было показано, что теоретическая кривая хорошо приближает численные экспериментальные результаты.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007.



Литература

1. Kitayama K.-I., Notomi M., Naruse M., Inoue K., Kawakami S., Uchida A. Novel frontier of photonics for data processing — Photonic accelerator // *Apl. Photonics*, 2019. Vol. 4. №9. P. 090901.
2. Shen Y., Harris N. C., Skirlo S., Prabhu M., Baehr-Jones T., Hochberg M., Sun X., Zhao S., Laroche H., Englund D. et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits // *Nature photonics*, 2017. Vol. 11. №7. P. 441–446.
3. Zhuang L., Roeloffzen C. G., Hoekman M., Boller K.-J., Lowery A. J. Programmable photonic signal processor chip for radiofrequency applications // *Optica*, 2015. Vol. 2. №10. P. 854–859.
4. Reck M., Zeilinger A., Bernstein H. J., Bertani P. Experimental realization of any discrete unitary operator // *Physical review letters*, 1994. Vol. 73. №1. P. 58.
5. Hamerly R., Bandyopadhyay S., Englund D. Accurate self-configuration of rectangular multiport interferometers // *Physical Review Applied*, 2022. Vol. 18. №2. P. 024019.
6. Barabash N. V., Sidorenko K. V., Nezhdanov A. V., Bobrov A. I. Accuracy of linear transformations performed on a nonideal Mach–Zehnder interferometer // *Optics Communications*, 2024. Vol. 566. P. 130686.

УДК 535.3

Моделирование волноводных делителей для снижения неравномерности потерь AWG-мультиплексора

Бабичек И. В.^{1,2}, Сапегин А. А.¹¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

babichek.iv@phystech.edu

Рассмотрена литература по известным методам компенсации неравномерности потерь выходных каналов AWG-мультиплексора. Проведен теоретический анализ метода компенсации неравномерности с помощью перераспределения энергии между соседними волноводами массива волноводов. Предложен новый вид делителя для структур с низкой контрастностью, позволяющий достигнуть неравномерности потерь менее 0,5 дБ.

Ключевые слова: мультиплексор; массив волноводов; неравномерность; фотоника; спектр.

Введение

В настоящее время активно растут требования к быстродействию электронных устройств. Причиной этого является увеличение количества устройств, подключенных к сети Интернет, и популяризация облачных технологий. Все это приводит к увеличению нагрузки на дата-центры. А с ростом дата-центров увеличивается актуальность обеспечения энергоэффективности приемо-передающих устройств [1, 2]. Оба этих требования может удовлетворить интегральная фотоника.

Обеспечить параллельную передачу сигналов внутри дата-центров с высокой скоростью позволяет технология спектрального уплотнения каналов (WDM), которая определяет каждому каналу информации свою длину волны для передачи информации внутри оптоволокну. В этой технологии важным элементом становится неблокирующий оптический переключатель — оптический роутер. Одной из реализаций этой технологии является роутер на основе массива волноводов (AWG).

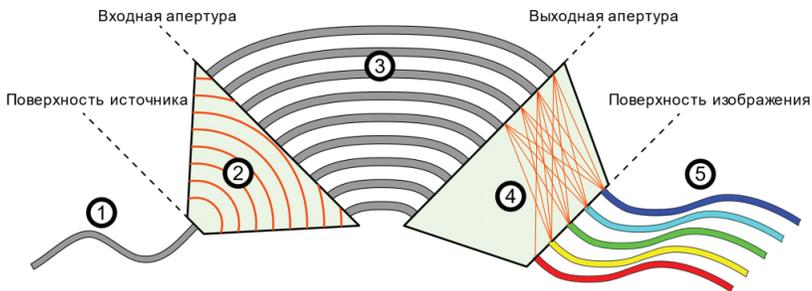


Рис. 1. Схема мультиплексора на основе массива волноводов (AWG)

Такое устройство использует всю дисперсионную область фазированной решетки волноводов, позволяя сделать N^2 соединений с использованием только N длин волн. Ввиду особенностей конструкции устройства при удалении от центрального канала происходит увеличение потерь вплоть до 3 дБ (по энергии) на крайних каналах, соответствующих границам дисперсионной области. Этот эффект называется неравномерностью потерь. Для применения AWG в качестве роутера необходимо обеспечить одинаковые потери на всех каналах.

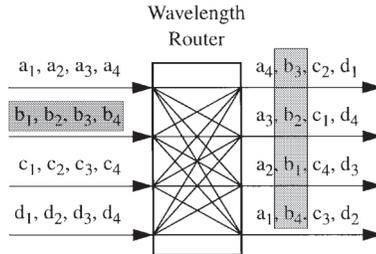


Рис. 2. Принцип действия оптического роутера. Латинскими буквами обозначены входные каналы, а индексы обозначают разные длины волн (одинаковые индексы соответствуют одинаковым длинам)

Компенсация неравномерности

Неравномерность потерь обуславливается наличием общей огибающей для пятна изображения. Чтобы более точно понять природу огибающей, необходимо ввести некоторые обозначения. Будем обозначать дальней поле источника с профилем излучения $U(x)$ добавлением шляпки. Для расчета дальнего поля будем использовать интеграл Гюйгенса — Френеля:

$$\hat{U}(\xi, x) = \frac{1}{\sqrt{i\lambda}} \int_{-\infty}^{+\infty} U(\xi) K(\xi, x) \frac{\exp(ikr(\xi, x))}{\sqrt{r(\xi, x)}} d\xi.$$

Используем параксиальное приближение:

$$r(\xi, x) = r_0(x) + \xi \cdot r_1(x) + O(\xi^2).$$

Так, из интеграла можно выделить преобразование Фурье:

$$\widehat{U}(\xi) = \hat{U}(x) = \frac{\exp(ikr_0)}{\sqrt{i\lambda r_0}} K_0 \int_{-\infty}^{+\infty} U(\xi) \exp(ikr_1 \xi) d\xi = \frac{\exp(ikr_0)}{\sqrt{i\lambda r_0}} K_0 \cdot \mathcal{F}(U).$$

Запишем поле изображения как сумму дальних полей волноводов массива с некоторыми весовыми коэффициентами A_j :

$$F(x) = \sum_j A_j \widehat{M}(\xi - \xi_j).$$

Используя свойство преобразования Фурье $f(t-a) \rightarrow e^{-i\omega a} F(\omega)$, получим

$$F(x) = \hat{M}(x) \cdot \sum_j A_j e^{-ikr_1 \xi_j}.$$

То есть огибающая поля изображения — это дальнее поле одного волновода массива.



Идеальный вариант — иметь огибающую в виде прямоугольной функции, которая принимает значение 0 снаружи дисперсионной области устройства. Известно, что прямоугольная функция является Фурье-образом кардинального синуса $\text{sinc}x = \frac{\sin x}{x}$. Таким образом, для обеспечения желаемого вида огибающей нужно обеспечить амплитудно-фазовый профиль сигнала на выходе из каждого волновода массива в виде $\text{sinc}x$.

В литературе для обеспечения такого излучения различными способами вводят связь полей в соседних волноводах массива [5, 6]. Часть энергии поля, распространяющаяся в соседних волноводах, играет роль вторичных пиков функции $\text{sinc}(x)$.

Использование гауссова приближения мод волновода ($E_0(x) = e^{-\left(\frac{x}{w_0}\right)^2}$) позволяет записать амплитудно-фазовое распределение на выходе из волновода так:

$$E_1(x) = p_0 e^{-\left(\frac{x}{w_0}\right)^2} + p_1 e^{i\Delta\varphi} \left(e^{-\left(\frac{x-s}{w_0}\right)^2} + e^{-\left(\frac{x+s}{w_0}\right)^2} \right),$$

где $w_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} w_e$, $w_e = w_{arr} \left(0,5 + \frac{1}{V-0,6} \right)$ — эффективная ширина моды [7], w_{arr} — ширина волновода массива, $V = kw_{arr} \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$ — V-параметр волновода массива, p_0 и p_1 — амплитудные коэффициенты излучения в центральном и боковом волноводе соответственно.

Используя свойства преобразования Фурье, дальнейшее поле можно записать как

$$\hat{E}_1(x) = \frac{p_0 w_0}{\sqrt{2}} e^{-\frac{x^2 w_0^2}{4}} + \frac{p_1 w_0}{\sqrt{2}} e^{i\Delta\varphi} \left(e^{-\frac{x^2 w_0^2}{4}} e^{-ixs} + e^{-\frac{x^2 w_0^2}{4}} e^{ixs} \right).$$

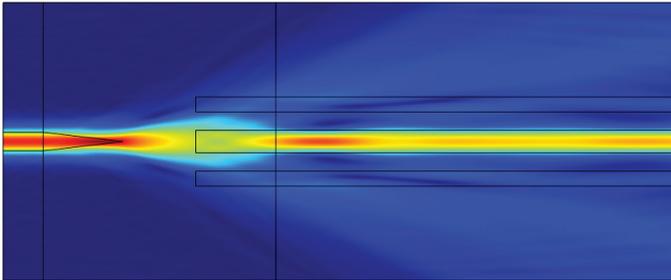


Рис. 3. Норма поля в делителе 1×3. Горизонтальное смещение входных волноводов относительно выходных изменяет соотношение между p_0 и p_1 . Различная ширина волноводов позволяет контролировать разность фаз между центральным и боковыми пиками с помощью изменения длины устройства

В данной работе исследуется использование делителей внутри волноводов массива. Предлагается новый вид делителей для структур с низкой контрастностью показателей преломления в виде волноводов, заканчивающихся треугольниками (см. рис. 3). Изменяя длину треугольников в делителе и горизонтальное смещение входов относительно выходов, можно контролировать количество энергии, переходящее в боковые волноводы (множители p_0 и p_1). Боковые волноводы

имеют отличную от центральных ширину, а значит, другую постоянную распространения. Таким образом, изменение длины участка между делителем и выходной областью свободного распространения AWG определяет разность фазы $\Delta\varphi$ между центральным и боковыми пиками сигнала. Также было проведено численное исследование зависимости характеристик огибающей от параметров перекачки и геометрических параметров AWG.

Для мультиплексора с параметрами из статьи [5] были получены две конфигурации делителя, описанные в табл. 1.

Таблица 1. Геометрические параметры полученных делителей и делителя, описанного в статье [5], а также реализуемая с их помощью неравномерность и вносимые ими потери

	Делитель 1	Делитель 2	Делитель (статья)
Показатели преломления	1,465, 1,455		
Ширина основного, центрального, бокового волновода, мкм	5, 6, 5		6, 7, 7
Длина треугольного наконечника L, мкм	50		—
Общая длина, мкм	287	228,8	~150
Горизонтальное смещение f, мкм	72,5	45	—
Неравномерность потерь, дБ	0,76	0,14	0,5–0,1
Дополнительные потери центрального пика (усредненная высота), дБ	0,9	0,96	3
Дополнительные общие потери, дБ	1,42	0,82	3
Общие потери, дБ	2,32	1,78	6

Заключение

Предложено теоретическое описание возникновения неравномерности, структура на основе особых делителей для сред с низкой контрастностью показателей преломления для компенсации неравномерности потерь в AWGR. В результате моделирования было получено значение неравномерности в 0,14 дБ при общих потерях, вносимых структурой, менее 2 дБ.

Литература

1. Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Мытник К. Я. Перспективы развития универсальной защищенной программно-аппаратной платформы со сверхнизким потреблением для устройств Интернета вещей // Наноиндустрия, 2019. — № S (89). — С. 328.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано-и микросистемная техника, 2009. — Т. 102. — № 1. — С. 2.
3. Wang K. et al. ADON: a scalable AWG-based topology for datacenter optical network // Optical and Quantum Electronics, 2015. Vol. 47. P. 2541–2554.
4. Grani P. et al. Flat-topology high-throughput compute node with AWGR-based optical-interconnects // Journal of Lightwave Technology, 2016. Vol. 34. № 12. P. 2959–2968.



5. Chen Y. et al. Uniform-loss cyclic arrayed waveguide grating router using a mode-field converter based on a slab coupler and auxiliary waveguides // *Optics Letters*, 2019. Vol. 44. № 2. P. 211–214.
6. Song G. et al. Silicon-based cyclic arrayed waveguide grating routers with improved loss uniformity // *Optics Communications*, 2018. Vol. 427. P. 628–634.
7. Smit M. K., Van Dam C. PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications // *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 1996. Vol. 2. № 2. P. 236–250.

УДК 621.389

Получение и исследование фотонно-кристаллических структур фиброина шелка на основе пленок коллоидного полистирола и кремнезема для изделий биофотоники

Медведева О. М., к. т. н., Панфилова Е. В., Ибрагимов А. Р., Мозер К. В.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
tom-bmstu@mail.ru

Представлены результаты исследования процесса получения фотонно-кристаллических структур посредством внедрения пластифицированного фиброина шелка в коллоидные пленки. Показано, что спектральные характеристики структуры зависят от параметров процесса формирования коллоидного кристалла, свойств раствора фиброина и условий пропитки.

Ключевые слова: природоподобные технологии; самоорганизация; коллоидные фотонно-кристаллические пленки; фиброин шелка; центрифугирование.

Коллоидная самоорганизация является технологичным способом получения микро- и наноразмерных структур. Коллоидные фотонные кристаллы считаются одним из наиболее перспективных классов материалов для применения в приборах оптического и микроволнового диапазонов [1]. Комбинируя свойства фотонных кристаллов и полимерных материалов, можно создать структуры, объектами применения которых будут устройства коммутативной памяти, трибоэлектрические генераторы и сенсорные элементы. Перспективы использования, например, фибриллярного фиброина шелка связаны с его биосовместимостью, биodeградацией, достаточной термостабильностью, механической прочностью, гибкостью и оптической прозрачностью [2]. В частности, применение фиброина в качестве функционального материала при получении инверсной коллоидной структуры позволяет создать фотонно-кристаллический материал, который можно использовать в гибкой электронике и фотонике медицинского назначения. Мы показали, что чувствительность сформированной таким образом сенсорной структуры достаточна для производства на ее основе умных диагностических контактных линз, осуществляющих спектральную диагностику.

В этой работе исследуется процесс формирования описываемой структуры. Для осаждения коллоидной пленки заданной толщины и плотности упаковки использовалось классическое центрифугирование в пробирках [3]. Этим способом можно производить нанесение на гибкие или шероховатые поверхности, что делает его интересным с точки зрения комбинирования с биосовместимыми материалами. Внедрение раствора фиброина с пластифицирующей добавкой глицерина осуществлялось капельным методом. В результате были получены композитные структуры, положение фотонной запрещенной зоны в которых определяется режимами получения коллоидной пленки, параметрами раствора фиброина и условиями пропитки.

Результаты работы будут использованы в технологии изготовления образцов гибких биосовместимых фотонно-кристаллических сенсорных элементов.



Литература

1. Fenglian Qi, Zihui Meng, Min Xue, Lili Qiu, Recent advances in self-assemblies and sensing applications of colloidal photonic crystals // *Analytica Chimica Acta*, 2020. Vol. 1123. P. 91–112.
2. Wang Y., Li M., Wang Y. Silk: a versatile biomaterial for advanced optics and photonics // *Chinese Optics Letters*, 2020. Vol. 18. № 8. P. 080004.
3. Ibragimov A. R. et al. Technology of Producing Photonic Crystal Colloidal Films by Centrifugation // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE, 2024. P. 1–5.

УДК 621.372.8

Разработка процессов формирования слоев SiON, SiO₂ и БФСС методом PECVD для создания волноводных структур фотонных интегральных схем

Митрофанов Я.Ю.^{1,2}, Светиков В.В.¹, Абросимов В.Ю.¹

¹ АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
mitrofanov@zntc.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработаны оптимальные режимы формирования функциональных слоев волноводных структур интегрально-оптического мультиплексора SiON, SiO₂ и БФСС. Измерены геометрические и оптические параметры полученных функциональных слоев, а также исследовано влияние различного времени отжига на оптические потери и наличие водородных связей N-H.

Ключевые слова: фотоника; волноводы; PECVD; SiON; SiO₂; БФСС; FTIR.

Последние 30–40 лет объемы передачи данных постоянно растут. Оптический метод передачи данных, такой как спектральное уплотнение (CWDM и DWDM), позволяет увеличить пропускную способность телекоммуникационных сетей. Технологии кремниевой фотоники стали основой для создания волноводных структур в составе фотонных интегральных схем. К настоящему времени материалами, используемыми в данной технологии, стали SiON, SiO₂:GeO₂, Si₃N₄, SOI.

Волноводные структуры формируются путем создания трехслойной структуры (нижний кладдинг / волноводный слой / верхний кладдинг). Одним из методов формирования функциональных слоев волноводов является плазмохимическое осаждение из газовой фазы (PECVD).

Целью работы является разработка базовой технологии формирования нижнего кладдинга (SiO₂), волноводного слоя (SiON) и верхнего кладдинга (БФСС) волноводных структур интегрально-оптического мультиплексора, поиск оптимальных режимов осаждения функциональных слоев и исследование их геометрических, оптических, химических свойств. Изготовление таких устройств, как интегрально-оптические мультиплексоры, в перспективе позволило бы не только создавать рыночно конкурентные изделия, но и обеспечивать дальнейшее развитие интегрально-оптической технологии в отечественном технологическом пространстве.

В процессе экспериментов были выявлены оптимальные режимы осаждения термического SiO₂, волноводного слоя SiON и верхнего функционального слоя БФСС. Были проведены эксперименты для определения влияния различного времени отжига (3, 6 и 9 часов) на показатель преломления и толщину слоев SiON. В результате отжига наблюдалось спекание и уменьшение слоев SiON в среднем на 200 нм, тогда как показатель преломления увеличивался в среднем на 0,02. Волноводный слой исследовался методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии для определения распределения элементного состава SiON. С увеличением времени отжига уменьшалось количество водородных связей



и увеличивалось количество связей материалообразующих элементов (Si–O–N). В связи с этим увеличивалась их атомная концентрация в пленке. Для определения влияния водородных связей на оптические потери волноводного слоя SiON были проведены исследования методом ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье. Исследования показали наличие водородной связи N–H, влияние которой уменьшается с увеличением времени отжига слоев SiON.

Таким образом, выявлены оптимальные режимы, исследованы оптические, геометрические и химические свойства осажденных функциональных слоев, как следствие, разработана базовая технология формирования низкоконтрастных ($\Delta = 1,5$ и $2,7\%$) волноводов, которая может быть использована в серийном изготовлении отечественных пассивных фотонных интегральных схем.

УДК 681.7.068

Волоконно-оптические элементы отечественного производства для ввода-вывода излучения при сборке фотонных интегральных схем

Паньков А. С., Пономарев Р. С., к. ф.-м. н.

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
lab.photon.psu@gmail.com

Разработаны технологии формирования волоконных микролинз и оптических скошенных волокон, применяемых для торцевого и вертикального ввода излучения в чипы фотонных интегральных схем. Приводится описание процедуры паспортизации волоконно-оптических элементов ввода.

Ключевые слова: волоконная микролинза; оптический волоконный скос; фотонная интегральная схема; ввод-вывод оптического излучения.

Фотонные интегральные схемы (ФИС) представляют собой сложные устройства на плоской подложке оптического кристалла. Они предназначены для обработки оптических сигналов и используются в большинстве телекоммуникационных оптоэлектронных устройств. ФИС являются основой для биологических сенсоров и различных датчиков физических величин. При сборке ФИС возникает проблема несоответствия диаметра сердцевины оптического волокна и поперечного сечения оптического волновода, что приводит к потерям оптического сигнала. Для уменьшения потерь в месте стыковки оптического волокна и поверхности волновода используют микролинзы для торцевого ввода и сплюснутые под углом оптические волокна для вертикального ввода излучения [1].

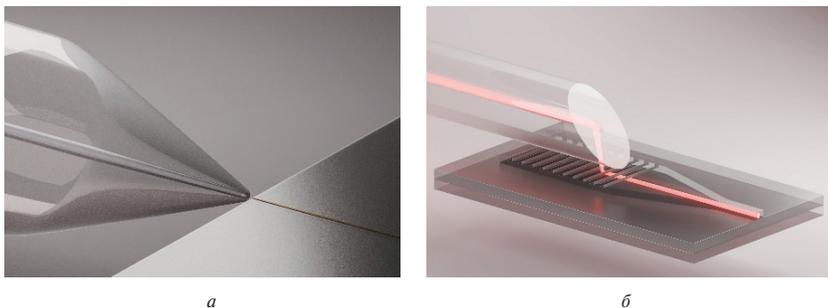


Рис. 1. Схема ввода оптического излучения в ФИС: а) торцевой ввод; б) вертикальный ввод

Технологии формирования этих волоконно-оптических элементов основываются на использовании электрической дуги сварочного аппарата и устройства для шлифовки торцов оптического волокна [2]. Специалисты лаборатории фотоники разработали инновационные технологические подходы, позволяющие создавать микролинзы и оптические скосы с фиксированными параметрами с использованием отечественных комплектующих. К параметрам, описывающим эти оптические



элементы, относятся: фокусное расстояние, диаметр поля моды, поляризация оптического излучения и угол при вершине оптического скоса. Все указанные параметры оцениваются с помощью единого комплекса, который позволяет паспорттировать небольшие партии изготавливаемых волоконно-оптических элементов или каждого элемента в отдельности.

Литература

1. Song J. H., Maltings L. Experimental investigation of laser welding assembling sequences for butterfly laser module packages // Optical Engineering, 2010. Vol. 49. P. 014301–014301-6.
2. Karnick D., Bauditsch N. Efficient, easy-to-use, planar fiber-to-chip coupling process with angle-polished fibers // IEEE 67th Electronic components and technology conference, 2017. P. 1627–1632.



УДК 535.93

Детектор терагерцевого излучения на основе графена, интегрированного на кремниевый волновод

Измайлов Р. И.^{1,2}, Любчак А. Н.^{1,3}, Шеин К. В.^{1,3}, Гайдученко И. А.^{1,3}, Гольцман Г. Н.^{1,3}

¹ Московский педагогический государственный университет
119991, г. Москва, ул. М. Пироговская, 1, стр. 1
ramilizmaylov2001@gmail.com

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11

В данной работе предложена модель детектора на основе CVD-графена, интегрированного на кремниевый волновод для работы на частоте 150 ГГц, а также были исследованы пределы чувствительности CVD-графена методом шумовой термометрии при гелиевой температуре.

Ключевые слова: интегральная фотоника; терагерцы; двумерные материалы; графен.

Перспективной платформой для обработки сигналов является интегральная фотонная схема на основе кремния. В настоящее время ТГц-диапазон электромагнитного излучения является многообещающим для создания сетей 6G нового поколения. Графен обладает рекордно низкой теплоемкостью, слабой электрон-фононной связью и высокой подвижностью, а также легко интегрируется на различные подложки. Благодаря этому его можно рассматривать в качестве платформы для создания ТГц-детекторов на волноводе.

В данной работе представлена модель кремниевого волновода на основе эффективной диэлектрической среды с интегрированным детектором на основе CVD-графена с сопротивлением 500 Ом. Для моделирования эффективной диэлектрической среды необходимо создать сквозные отверстия с периодом, меньшим длины волны, по сторонам сердечника волновода. Эти отверстия образуют треугольную решетку. В этой конфигурации волновод работает по принципу, аналогичному оптическому волокну, где свет распространяется за счет полного внутреннего отражения. Для связи излучения из металлического волновода в диэлектрический использовался кремниевый сужающийся волновод с углом раскрытия $\alpha = 10^\circ$. Волновод представляет собой кремниевую пластину толщиной $H = 400$ мкм и шириной $W = 585$ мкм. Для повышения поглощения электромагнитного излучения, испускаемого из волновода графеном, использовалась идея сужающейся щелевой линии [1]. Этот подход уменьшает площадь графена до квадрата 2×2 мкм, что улучшает чувствительность детектора. Конструкция детектора включает асимметричные контакты, которые доказали свою эффективность в изготовлении графеновых ТГц-детекторов, используя как фотоэлектрический, так и термоэлектрический эффекты [2]. Волновод смоделирован для работы на 150 ГГц. Для данной конфигурации по результатам моделирования коэффициенты отражения и передачи равняются: $S_{33} = -10$ дБ, $S_{31} = S_{32} = -4,3$ дБ. Потери на входе составили 0,18 дБ.



Для оценки фундаментальных пределов чувствительности ТГц-детекторов на основе графена был использован метод шумовой термометрии. С помощью данного метода была измерена электронная температура в CVD-графене при пропускании через него тока, измерения проводились в гелиевой температуре. Были оценены электронная теплоемкость в графене $G = 6,7 \text{ нВт/К}$ и эквивалентная мощность шума, которая составила $47 \text{ пВт/Гц}^{0,5}$. Полученные данные могут быть использованы для изготовления реального детектора.

Литература

1. Shurakov A. S., Belikov I. I., Prikhodko A. N., Ershova M., Goltsman G. N. Superconducting Electronic–Photonic Platform for HEB-Based Terahertz Spectrometers // Applied Sciences, 2023. 13 (10). 5892.
2. Gayduchenko I. A., Moskotin M. V., Matyushkin Y. E., Rybin M. G., Obratsova E. D., Ryzhii V. I., Goltsman G. N., Fedorov G. E. The detection of sub-terahertz radiation using graphene-layer and graphene-nanoribbon FETs with asymmetric contacts // Materials Today: Proceedings, 2018. 5(13), 27301–27306.

УДК 538.958

Управление зонной структурой и люминесцентным откликом двумерных фотонных кристаллов с nanoостровками Ge(Si)**Перетокин А. В.¹, Степихова М. В.¹, Юрасов Д. В.¹, Яблонский А. Н.¹, Шалеев М. В.¹, Дьяков С. А.², Родякина Е. Е.³, Новиков А. В.¹**¹ Институт физики микроструктур РАН603087, Нижегородская обл., д. Афоново, ул. Академическая, 7
aperetokin@ipmras.ru² Сколковский институт науки и технологий

143025, г. Москва, Большой бул., 30, стр. 1

³ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

Изучены методы управления зонной структурой и люминесцентным откликом фотонных кристаллов с nanoостровками Ge(Si) за счет изменения дизайна решетки фотонных кристаллов (ФК). Продемонстрировано усиление сигнала более чем на два порядка величины и наблюдение узких спектральных линий с добротностью более $3 \cdot 10^3$ при оптимальном дизайне структур.

Ключевые слова: фотонные кристаллы; SiGe-гетероструктуры; люминесценция; Si фотоника.

На сегодняшний день остается нерешенной проблема создания источников ближнего-ИК-диапазона, совместимых с кремнием. Кремниевые структуры с nanoостровками Ge(Si) являются одним из возможных решений данной задачи. Для повышения излучательной эффективности таких структур их встраивают в различные микрорезонаторы, наиболее перспективными из которых являются фотонные кристаллы [1].

В данной работе методами спектроскопии микрофотолюминесценции (микро-ФЛ) исследуется взаимодействие nanoостровков Ge(Si) с модами фотонных кристаллов с гексагональной решеткой отверстий. Все исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на КНИ-подложках. Основными параметрами ФК, которые можно варьировать, являются: период, радиус отверстий, глубина травления отверстий, а также полная толщина волноводного слоя.

Наибольший рост интенсивности сигнала ФЛ наблюдается при спектральном совпадении мод ФК с максимумом люминесценции nanoостровков Ge(Si), осуществляя такое совмещение позволяет варьирование периода ФК [2]. Это также можно делать, изменяя полную толщину волноводного слоя ФК, однако это более сложно технологически. Наиболее эффективным инструментом управления зонной структурой и, как следствие, люминесцентным откликом ФК является изменение глубины травления отверстий. Это позволяет формировать для определенных мод плоскую дисперсионную характеристику, что приводит к росту интенсивности сигнала более чем на два порядка величины по сравнению с областью без ФК [3]. Изменение радиуса отверстий также позволяет дополнительно подстраивать зонную структуру и люминесцентный отклик ФК, но имеет определенные технологические ограничения.



Кроме того, можно понизить симметрию ФК за счет деформации решетки или отверстий, что позволяет добиться выделения одной моды в спектральном отклике ФК, а также получить высокодобротные линии с добротностью $Q \sim 3 \cdot 10^3$ [4].

Приводимые в данной работе экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами численного моделирования исследуемых ФК, выполненного Фурье-модальным методом в формализме матрицы рассеяния [5].

Работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники» (соглашение №075-15-2022-316).

Литература

1. Dyakov S. A., Stepikhova M. V., Bogdanov A. A. et al. Photonic Bound States in the Continuum in Si Structures with the Self-Assembled Ge Nanoislands // *Laser and Photonics Rev.*, 2021. Vol. 15. P. 2000242.
2. Stepikhova M. V., Dyakov S. A., Peretokin A. V. et al. Interaction of Ge(Si) Self-Assembled Nanoislands with Different Modes of Two-Dimensional Photonic Crystal // *Nanomaterials*, 2022. Vol. 12. P. 2687.
3. Peretokin A. V., Yurasov D. V., Stepikhova M. V. et al. Tuning the Luminescence Response of an Air-Hole Photonic Crystal Slab Using Etching Depth Variation // *Nanomaterials*, 2023. Vol. 15. P. 1678.
4. Yurasov D. V., Dyakov S. A., Smagin I. A. et al. Symmetry breaking of bound states in continuum in luminescence response of photonic crystal slabs with embedded Ge nanoislands // *Appl. Phys. Lett.* (*in print*).
5. Tikhodeev S. G., Yablonskii A. L., Muljarov E. A. Quasiguidded modes and optical properties of photonic crystal slabs // *Phys. Rev. B.*, 2002. Vol. 66. P. 045102.

УДК 535.3

Моделирование микрорезонаторов на зеркалах с брэгговскими решетками

Станкевич К. М., Бутковский О. Я.

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87
kristina.stankevich@bk.ru*

Целью работы являлось создание модели систем микрорезонаторов с брэгговскими зеркалами и наблюдение за изменениями параметров излучения при помощи имитационного моделирования. В работе представлены модели систем, созданные в Matlab. Показаны варианты изменяемых параметров выходного оптического излучения.

Ключевые слова: микрорезонаторы; брэгговские зеркала; имитационное моделирование; фотонные сигналы.

Имитационное моделирование систем с полупроводниковыми брэгговскими резонаторами позволяет наблюдать за изменением выходных фотонных сигналов в целях дальнейшего управления их параметрами. За счет микроскопических размеров резонаторов повышается точность и добротность выходного излучения с концентрацией в малом объеме — порядка микрометра [1].

Модель [2] представляет собой математическое представление процессов, происходящих в микрорезонаторе между двух брэгговских зеркал, а также имитирует часть самой системы. Имея возможность изменять параметры системы, такие как значение максимума пика коэффициента обратного рассеяния от дисперсии шума и положение максимума по длине волны от интенсивности шума, становится возможным добиваться максимальной концентрации оптического излучения в минимальном объеме.

Задача связанных квантовых осцилляторов требует разработки и аналитического решения с учетом большого числа налагаемых сложностей [3]. Для этого были применены численные методы для одного микрорезонатора.

Литература

1. Björk G., Machida S., Yamamoto Y., Igeta K. Modification of spontaneous emission rate in planar dielectric microcavity structures // *Physical Review*. 1991. A, 44(1), 669.
2. Stankevich K. M., Butkovskiy O. Y., Kochuev D. A., Chernikov A. S. and Privodnov I. I. Investigation of the dependence of the reflection coefficient on the modulation parameters and defects of the fiber Bragg gratings // *Journal of Physics: Conference Series*, 2316 012003. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2316/1/012003>.
3. Drummond P. D., McNeil K. J., Walls D. F. Non-equilibrium Transitions in Sub/Second Harmonic Generation // *Optica Acta*, 1981. Vol. 27. № 2. P. 211–225.



УДК 535.3

Новый подход к созданию активных фотонных элементов

Егоров П. А., Тимошенко А. С.

НИЛ «Волоконная и интегральная оптика»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Solovjev@polly.phys.msu.ru

Описывается метод модуляции оптического сигнала при помощи движущегося элемента и представляются общие теоретические концепции проектирования МОEMS оптического модулятора.

Ключевые слова: фотоника; фазовый модулятора; МЕМС; ФИС.

Кремниевая фотоника становится предпочтительной технологией для множества новых вычислительных платформ, таких как искусственные нейронные сети, обработка микроволновых сигналов и квантовые вычисления. На данный момент существует ряд подходов к созданию активных компонентов, но не один из них не стал доминирующим, по различным причинам.

Интеграция активных и пассивных фотонных компонентов на одном кристалле, особенно в кремниевой фотонике, сопряжена с рядом проблем:

- совместимость материалов;
- управление температурой;
- оптические потери;
- сложные производственные процессы;
- электрическая изоляция и перекрестные помехи.

Предложенный подход имеет потенциал для решения основных проблем интеграции компонентов на одной подложке и в перспективе для промышленного производства на базе МЕМС технологий.

Рассмотрен подход к созданию активных компонентов ФИС (фазовый модулятор) меняющие свой эффективный показатель преломления за счёт микроперемещений волноводных структур.

Литература

1. Liu S. et al. Thermo-optic phase shifters based on silicon-on-insulator platform: state-of-the-art and a review // *Frontiers of Optoelectronics*, 2022. Vol. 15. № 1. P. 9.
1. Liu K. et al. Review and perspective on ultrafast wavelength-size electro-optic modulators // *Laser & Photonics Reviews*, 2015. Vol. 9. № 2. P. 172–194.
1. Selvaraja S.K. et al. Subnanometer linewidth uniformity in silicon nanophotonic waveguide devices using CMOS fabrication technology // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009. Vol. 16. № 1. P. 316–324.
2. Сысоева С. Высокочастотные МЭМС-ключи. Технологии и применения // *Компоненты и технологии*, 2011. — № 11 (124). — С. 29–36.

УДК 621.3.049

Двумерные диэлектрические металинзы для создания портативных биосенсоров одиночных молекул**Барулин А. В.^{1,2}, Новиков С. М.¹, Чернов А. И.^{1,3}**¹ *Центр фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*² *Department of Biophysics, Institute of Quantum Biophysics, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Republic of Korea*³ *Российский квантовый центр 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1***Ключевые слова:** металинза; нанофотоника; одиночные молекулы; флуоресцентная корреляционная спектроскопия; биосенсоры.

Двумерные диэлектрические металинзы позволяют фокусировать свет с разрешением вплоть до дифракционного предела. Ввиду микрометровой толщины данная структура является компактным планарным аналогом объемных преломляющих оптических элементов. Металинзы находят свое применение в многофункциональных и компактных оптических устройствах для визуализации биологических объектов, однако детектирование одиночных молекул, являющееся ключевым элементом в молекулярной биологии и медицине, является сложной задачей. Мы представляем металинзу, созданную из нанометровых прямоугольных колонн аморфного кремния, которая имеет высокую числовую апертуру и фокусирующую способность. Данная металинза позволяет детектировать одиночные флуоресцентные молекулы Alexa647 методом флуоресцентной корреляционной спектроскопии, а также способна определять размеры флуоресцентных наночастиц с нанометровой точностью [1]. Данное оптическое устройство многократно уменьшает размер преломляющего объектива и практически не теряет эффективности сбора фотонов при тех же значениях числовой апертуры. Таким образом, данная нанофотонная платформа позволит создавать компактные и портативные флуоресцентные биосенсоры для средств медицины и диагностики на месте оказания медицинской помощи и средства для скрининга загрязнений окружающей среды.

Работа была выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-622). Моделирования флуоресцентной корреляционной спектроскопии выполнены в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

Литература

1. Barulin A. et al. Dual-wavelength metalens enables Epi-fluorescence detection from single molecules // Nature Communications, 2024. 15.1: 26.



УДК 537.86

Расчет потерь одномодового режима распространения оптического излучения в микроволноводах из GaAs/AlGaAs и AlGaAs на изоляторе

Крылова О. А., Витько В. В., к. ф.-м. н., Еськов А. В., к. т. н.,
Никитин А. А., к. ф.-м. н., Семенов А. А., д. т. н., Устинов А. Б., д. ф.-м. н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет им. В. И. Ленина (Ульянова)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
oakrylova@yandex.ru

В работе исследованы потери оптического излучения в одномодовых микроволноводах из GaAs/AlGaAs и AlGaAs на изоляторе. Проведен расчет дисперсионных характеристик и потерь на распространение в интегральных канальных и полосковых микроволноводах различных геометрий поперечного сечения.

Ключевые слова: оптический микроволновод; арсенид галлия; AlGaAs на изоляторе; оптические потери.

В настоящее время результаты передовых исследований, направленных на создание фотонных интегральных схем (ФИС), привели к революционно новым применениям в системах квантовой телекоммуникации, квантовой обработки информации и смежных сферах [1]. Однако до сих пор остается неудовлетворенной потребность в технологической платформе, позволяющей интегрировать как активные, так и пассивные элементы ФИС. В связи с этим особое внимание уделяется GaAs и соединениям на его основе, составляющим конкуренцию таким хорошо изученным технологиям, как кремний на изоляторе и ниобат лития на изоляторе [2].

Основным элементом ФИС является прямоугольный микроволновод, работающий в одномодовом режиме. Сочетание материалов GaAs/ Al_xGa_{1-x} As и технологии Al_xGa_{1-x} As на изоляторе позволяет реализовать достаточно высокий контраст показателей преломления [3]. При этом выбор материалов обусловлен возможностью уменьшить потери на распространение оптического излучения. Целью данной работы является расчет и сравнение оптических потерь в одномодовых прямоугольных микроволноводах из GaAs/ Al_xGa_{1-x} As и Al_xGa_{1-x} As на изоляторе.

Рассмотрим распространение волны оптического диапазона в наиболее распространенных типах микроволноводов — канальном и полосковом. Согласно теоретической модели (см. работу [4]), рассчитаны диапазоны толщин t и ширины w , позволяющие реализовать одномодовый режим распространения волны типа E^x . Для полосковых волноводов с толщиной $t_1 = 0,22$ мкм из GaAs/AlGaAs — $w_1 \in [1,4; 2]$ мкм, из AlGaAs на изоляторе — $w_1 \in [0,3; 0,6]$ мкм. В случае канальных волноводов из GaAs/AlGaAs — $w_1 \in [0,55; 1,35]$ мкм, из AlGaAs на изоляторе — $w_1 \in [0,3; 0,65]$ мкм. Стоит отметить, что при большей толщине $t_2 = 0,4$ мкм волновода становится возможной реализация микроволноводов меньшей ширины (например, одномодовый режим для канального GaAs/AlGaAs достигается при $w_2 \in [0,22; 0,95]$ мкм).

Потери на распространение основной моды в рассматриваемых структурах рассчитывались с применением элементов теории возмущений [5]. По результатам



моделирования получены зависимости декремента затухания от ширины сердцевин канальных и полосковых волноводов разных толщин. Показано, что при малых ширинах как канальных, так и полосковых микроволноводов наблюдается локальный максимум декремента затухания. Это связано с локализацией поля внутри сердцевин волновода. Контраст показателей преломления определяет положение максимума: при малом контрасте (GaAs/AlGaAs-микроволноводы) максимум возникает при w , меньше, чем t . Важно отметить, что в этом случае электромагнитное поле оптического излучения значительно выходит за пределы волновода, что не позволяет ему сохранить волноведущие свойства. Увеличение толщины волноведущих структур приводит к большей локализации поля внутри сердцевин волновода. Численное моделирование зависимости декремента затухания от ширины волновода показало, что для полоскового и канального микроволноводов с увеличением ширины потери становятся одинаковыми и соответствуют 1,53 дБ/см для GaAs/AlGaAs и 1,56 дБ/см для AlGaAs на изоляторе. При этом уровень потерь в волноводах с шириной более 1,2 мкм определяется материальными параметрами сердцевин и окружающего диэлектрика, а не геометрическими размерами. За счет того что у GaAs мнимая часть диэлектрической проницаемости меньше, чем у $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$, используемого как сердцевина AlGaAsOI-микроволноводов, канальные GaAs/AlGaAs-микроволноводы позволяют реализовать одномодовый режим работы с наименьшими потерями на распространение.

Таким образом, разработанная оригинальная теоретическая модель позволяет рассчитать как дисперсионные характеристики оптического излучения, так и потери на его распространение в канальных и полосковых волноводах из GaAs/AlGaAs и AlGaAs на изоляторе.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант №ФСФЕ-2020-0005).

Литература

1. Wang J., Sciarrino F., Laing A., Thompson M. G. Integrated photonic quantum technologies // Nature Photonics, 2019. Vol. 14. № 5. P. 273–284.
2. Baboux F., Moody G., Ducci S. Nonlinear integrated quantum photonics with AlGaAs // Optica, 2023. Vol. 10. № 7. P. 917–931.
3. Adachi S. Properties of Aluminium Gallium Arsenide. Japan: Gunma University, 1993. 233 p.
4. Витько В. В., Крылова О. А., Еськов А. В., Устинов А. Б. Исследование одномодового режима распространения оптического излучения в интегральных микроволноводах из арсенида галлия // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2023. — С. 493–496.
5. Pozar D. M. Microwave engineering. John Wiley & sons, 2011. 754 p.



УДК 621.39

Моделирование модовых конвертеров на основе волнового и субволнового сегментированного тейпера

Крылов А. А.^{1,2,3}, Барабаненков М. Ю.¹, д. ф.-м. н., Светиков В. В.^{3,4}, к. ф.-м. н., Шамин Е. С.^{1,2,3}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
example@gmail.com

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

⁴ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Рассмотрена задача о конвертации моды между оптоволоконном и полосковым волноводом ФИС на основе структур КНИ или оксинитрида кремния. Установлено, что конвертеры на основе тейпера с волновой и субволновой сегментацией имеют уровень потерь не хуже уровня потерь конвертеров со сплошным тейпером при меньшей общей длине конвертера.

Ключевые слова: конвертер; ФИС; КНИ; тейпер; сегментированный волновод.

Введение

В настоящее время доступно множество высокопроизводительных оптических компонентов в интегральном исполнении, таких как направленные ответвители, Y-образные ответвители, брэгговские решетки, кольцевые резонаторы, оптические модуляторы, устройства ввода/вывода излучения. Данные устройства функционируют как связующее звено между ФИС и оптоволоконном, являясь основным каналом передачи оптических сигналов на большие расстояния. Как известно, стандартное одномодовое оптоволоконно для телекоммуникационной длины волны в 1,55 мкм обычно имеет сердцевину диаметром 2–8 мкм без учета обкладок. Сечение же стандартного полоскового волновода в интегральном исполнении составляет 220×500 нм. Очевидно, что большое несоответствие размеров сечений оптоволоконна и волновода существенно ограничивает эффективность их оптической связи [1].

Для решения задачи о передаче света из оптоволоконна в ФИС используются модовые конвертеры. Типы этих устройств можно разделить на конвертеры с вертикальным вводом [2] и стыковочные конвертеры [3]. В обзорной части работы показано, что последние являются перспективным объектом исследований ввиду их потенциально большей эффективности и меньшей площади.

Описание работы

В этой работе методом компьютерного моделирования исследованы потери энергии моды конвертеров со сплошным тейпером и тейпером, сегментированным с периодом, большим рабочей длины волны (волновая сегментация) и меньшим

длины волны (субволновая сегментация). Общая схема расчета конвертера состоит в следующем:

- 1) разрабатывается топология конвертера;
- 2) производится расчет эволюции моды оптоволокна методом распространения пучка;
- 3) полученные результаты используются для построения зависимости эффективности конвертера от его топологических параметров.

В табл. 1, 2 приведены топологические параметры наиболее эффективных конвертеров и их эффективность.

Таблица 1. Сравнение наиболее эффективных моделей конвертеров на основе линейных тейперов и конвертеров на основе волновых дискретных волноводов

Параметр/тип конвертера	На основе линейного тейпера			На основе волновых дискретных волноводов		
	2,7%	1,5%	0,8%	2,7%	1,5%	0,8%
Контраст	2,7%	1,5%	0,8%	2,7%	1,5%	0,8%
Длина конвертера, мкм	700	450	500	200	450	400
Начальная ширина конвертера, мкм	0,5	0,9	0,9	0,5	0,9	0,9
Конечная ширина конвертера, мкм	3	4	4	3	4	4
Расстояние между сегментами, мкм	–	–	–	0,9	1	1
Длина сегмента, мкм	–	–	–	4	4	4
Эффективность, дБ	0,4	0,4	0,3	0,7	0,5	0,2

Таблица 2. Сравнение наиболее эффективных моделей конвертеров на основе линейных тейперов и конвертеров на основе субволновых дискретных волноводов

Параметр/тип конвертера	На основе линейного тейпера	На основе волновых дискретных волноводов
Длина конвертера, мкм	37	11
Начальная ширина конвертера, мкм	3,7	1,2
Конечная ширина конвертера, мкм	0,4	0,4
Расстояние между сегментами, мкм	–	0,9
Длина сегмента, мкм	–	0,1
Эффективность, дБ	6,1	3,2

Заключение

В ходе моделирования установлено, что конвертеры на основе волновых и субволновых дискретных элементов являются перспективными ввиду их потенциально большей эффективности и меньшей площади, занимаемой на кристалле.



Литература

1. Papes M. et al. Fiber-chip edge coupler with large mode size for silicon photonic wire waveguides // Optics express, 2016. Vol. 24. № 5. P. 5026–5038.
2. Cheng L. et al. Grating couplers on silicon photonics: Design principles, emerging trends and practical issues // Micromachines, 2020. Vol. 11. № 7. P. 666.
3. Mu X. et al. Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: A review // Applied Sciences, 2020. Vol. 10. № 4. P. 1538.
4. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.

УДК 537.525

Механизмы влияния начального состава смесей $\text{CF}_4 + \text{O}_2$, $\text{CHF}_3 + \text{O}_2$ и $\text{CF}_4 + \text{CHF}_3 + \text{O}_2$ на параметры плазмы и кинетику реактивно-ионного травления кремния

Казначеева Е. М.¹, Ефремов А. М.²¹ Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Проведен анализ механизмов влияния начального состава смесей $\text{CF}_4 + \text{O}_2$, $\text{CHF}_3 + \text{O}_2$ и $\text{CF}_4 + \text{CHF}_3 + \text{O}_2$ на стационарный состав плазмы и кинетику травления кремния в типичных условиях реактивно-ионного процесса. При совместном использовании методов диагностики и моделирования плазмы: а) подтверждены основные свойства плазмы чистых фторуглеродных газов, известные из предшествующих работ; б) выявлены различия кинетики плазмохимических процессов в тетра- и трифторметане в присутствии кислорода; в) изучены закономерности образования и гибели активных частиц в условиях трехкомпонентной смеси при варьировании соотношения CF_4/CHF_3 . Найденно, что основной вклад в наблюдаемую скорость травления вносит химическая составляющая, при этом эффективная вероятность реакции $\text{Si} + x\text{F} = \text{SiF}_x$ зависит от начального состава смеси через изменение толщины фторуглеродной полимерной пленки и окисление поверхности.

Ключевые слова: CF_4 ; CHF_3 ; O_2 ; плазма; параметры; активные частицы; ионизация; диссоциация; травление; полимеризация.

Газы семейства фреонов ($\text{C}_x\text{H}_y\text{F}_z$) нашли повсеместное применение в технологии изделий микро- и нанозлектроники, а также микроэлектроники при проведении процессов реактивно-ионного травления (РИТ) кремния и его соединений [1]. Традиционным инструментом РИТ являются системы с индуктивно-связанной плазмой (ИСП), которые оснащены двумя независимыми источниками питания, обеспечивающими независимое регулирование потоков активных частиц и энергии ионной бомбардировки. Это дает возможность контролировать баланс между физической и химической составляющими скорости травления, что существенно расширяет доступный диапазон выходных характеристик РИТ (скорость травления, селективность травления по отношению к материалу маски и форме профиля травления). В то же время использование этого преимущества требует понимания взаимосвязей между условиями проведения процесса, кинетикой плазмохимических реакций, формирующих стационарные концентрации активных частиц, и механизмами их взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. Для решения этой задачи в нашей работе была использована комбинация методов диагностики плазмы (зонды Лангмюра, оптическая эмиссионная спектроскопия) и моделирования кинетики плазмохимических процессов.

При исследовании бинарных смесей $\text{CF}_4 + \text{O}_2$, $\text{CHF}_3 + \text{O}_2$ были подтверждены известные из предшествующих работ особенности состава плазмы в отсутствие кислорода (в частности, доминирование молекул HF в газовой фазе в плазме



трифторметана), а также выявлены механизмы влияния кислорода на стационарные концентрации нейтральных частиц через кинетику процессов при электронном ударе и атомно-молекулярных реакций. В частности, было обнаружено, что добавка кислорода: а) приводит к заметным изменениям параметров электронной и ионной компонент плазмы (средней энергии и концентрации электронов, плотности потока ионов), б) обеспечивает эффективную конверсию фторуглеродных радикалов CHF_x и CF_x в соединения вида CF_xO , FO и CO_x ; в) сопровождается ростом концентрации атомов фтора вплоть до 50% O_2 в смеси. В плазме $\text{CHF}_3 + \text{O}_2$ последний эффект противоречит изменению суммарной скорости генерации атомов, но обусловлен снижением частоты их гибели в газофазных реакциях семейства $\text{CHF}_x + \text{F} \rightarrow \text{CF}_x + \text{HF}$. При исследовании трехкомпонентной смеси $\text{CF}_4 + \text{CHF}_3 + \text{O}_2$ было обнаружено, что замена CF_4 на CHF_3 при фиксированном содержании кислорода в исходном газе: а) вызывает относительно слабые изменения температуры электронов и плотности плазмы; б) приводит к увеличению ее полимеризационной способности; в) значительно (более чем в три раза) снижает концентрацию атомов F. Последний эффект был подтвержден удовлетворительным согласием с экспериментальными данными, полученными с использованием метода оптической эмиссионной актинометрии.

В экспериментах по травлению было найдено, что скорость травления кремния немонотонно (с максимумом) зависит от содержания кислорода в бинарных смесях, но снижается с ростом содержания CHF_3 в трехкомпонентной смеси. Анализ кинетики травления позволил заключить, что: а) доминирующим механизмом травления является ионно-стимулированная химическая реакция; б) эффективная вероятность этой реакции зависит от начального состава смеси через изменение толщины фторуглеродной полимерной пленки и окисление поверхности.

Литература

1. Nojiri K. Dry etching technology for semiconductors. Springer International Publishing, Tokyo, 2015. 116 p.

УДК 004.896

Модель плазмохимического травления Si в среде SF₆/O₂ с использованием графовых нейронных сетей

Кузьмин В. О.^{1,2}, Седунов С. М.¹¹ ПАО «Сбербанк»

117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А

Разработана нейросетевая модель плазмохимического травления Si в среде SF₆/O₂. Произведено сравнение работы физического симулятора и графовой нейронной сети. Предложены методы по улучшению нейронной сети.

Ключевые слова: нейронная сеть; граф; плазмохимическое травление.

Плазмохимическое травление (ПХТ) играет важную роль в процессе производства интегральных схем (ИС), и на сегодняшний день разработано множество методов физического моделирования. Моделирование процесса позволяет проводить виртуальные эксперименты, при помощи которых можно как существенно ускорить разработку новых рецептов, так и оптимизировать существующие в целях повышения выхода годных. Подбор и оптимизация рецептов ставят повышенные требования к точности и скорости работы симулятора.

В последние годы проявляется все больший интерес к повышению эффективности и замене традиционных решателей на обучаемые модели. В качестве моделей используются графовые нейронные сети, так как они позволяют работать с нерегулярными сетками, что является крайне важным фактором при работе с деформируемыми объектами. Так, например, большим прорывом в области физического моделирования с использованием нейронных сетей стало создание MeshGraphNet [1]. Применение искусственного интеллекта потенциально предлагает многообещающее комплексное решение для ускорения и увеличения качества моделирования процесса ПХТ.

Авторы считают, что в данной работе новым является применение нейронных сетей в области плазмохимического травления.

В работе используется улучшенная версия MeshGraphNet — BSMS [2]. В BSMS добавлено использование двупольных графов для ускорения и улучшения работы нейронной сети.

В качестве моделируемого процесса было выбрано плазмохимическое травление SF₆/O₂. Для физического моделирования использовался открытый код симулятора ViennaPS, в котором реализован процесс травления [3]. Для обучения нейронной сети использовались синтетические данные, сгенерированные симулятором ViennaPS. В результате к задаче симуляции плазмохимического травления была применена графовая нейронная сеть.

Литература

1. Pfaff T. et al. Learning mesh-based simulation with graph networks // arXiv preprint arXiv:2010.03409. 2020.



2. Cao Y. et al. Efficient learning of mesh-based physical simulation with bi-stride multi-scale graph neural network // International Conference on Machine Learning. PMLR, 2023. P. 3541–3558.
3. Bobinac J. et al. Effect of mask geometry variation on plasma etching profiles // Micromachines, 2023. Vol. 14. № 3. P. 665.

УДК 537.525

Параметры плазмы, концентрации активных частиц и закономерности реактивно-ионных процессов в смесях фторуглеродных газов с аргоном и гелием

Малинина К. А.¹, Ефремов А. М.²¹ *Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7*² *АО «НИИМЭ»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1*

Проведено исследование параметров плазмы и кинетики гетерогенных процессов, протекающих при травлении кремния и его соединений, смесях CF_4 , CHF_3 и C_4F_8 с аргоном и гелием в условиях индукционного ВЧ-разряда (13,56 МГц). Установлено, что замещение аргона на гелий при постоянном содержании фторуглеродного компонента: а) оказывает влияние на кинетику образования активных частиц через изменение средней энергии и концентрации электронов; б) приводит к уменьшению скорости травления, вызванному падением концентрации атомов фтора из-за аналогичного изменения скоростей их образования. Сделаны предположения о механизмах влияния состава плазмообразующей смеси на эффективную вероятность взаимодействия атомов фтора с поверхностью исследованных материалов.

Ключевые слова: плазма; тетрафторметан; аргон; гелий; полимерная пленка; травление; моделирование; кинетика.

Фторуглеродные газы вида $\text{C}_x\text{H}_y\text{F}_z$ используются в технологии микро- и нанoeлектроники при проведении размерного травления кремния и его соединений [1]. Выходные характеристики таких процессов (скорость, селективность, анизотропия) в значительной степени зависят от соотношения z/x , определяющего полимеризационную способность плазмы. Для регулирования полимеризационной способности фторуглеродный газ часто комбинируют с химически инертным газом-носителем — азотом, аргоном или гелием.

В предшествующих работах было показано, что разбавление фторуглеродного газа аргоном влияет на кинетику активных частиц плазмы через изменение эффективности процессов под действием электронного удара. В результате имеют место нелинейные зависимости концентраций атомов фтора и полимеробразующих радикалов от начального состава смеси. К сожалению, аналогичные исследования смесей фторуглеродных газов с гелием отсутствуют, что затрудняет выбор оптимального газа-носителя для целей конкретного процесса. Целью данной работы являлось сравнение электрофизических параметров, состава, полимеризационной способности и химической активности плазмы смесей $\text{CF}_4 + \text{Ar} + \text{He}$, $\text{CHF}_3 + \text{Ar} + \text{He}$ и $\text{C}_4\text{F}_8 + \text{Ar} + \text{He}$ при замещении аргона на гелий.

Эксперименты проводились в реакторе индукционного типа при возбуждении ВЧ-разряда (13,56 МГц). Объектами исследования являлись смеси CF_4 , CHF_3 или C_4F_8 с аргоном и гелием, при этом в качестве переменного параметра выступало соотношение Ar/He . Зондовая диагностика обеспечивала данные по температуре электронов и плотности ионного тока. Для получения данных по составу плазмы

использовалась 0-мерная модель. Верификация модели проводилась по согласию расчетных концентраций атомов фтора с результатами измерения данной величины методом оптической актинометрии с использованием аналитической пары F (703,8 нм) / Ag (750,4 нм).

Показано, что замещение Ag на He приводит к снижению температуры и концентрации электронов, что обуславливает аналогичное изменение скоростей диссоциации многоатомных частиц. В результате имеет место значительное (до порядка величины) уменьшение концентрации атомов фтора, при этом в смесях на основе C_4F_8 и CHF_3 наблюдается заметный рост полимеризационной способности плазмы. Установлено, что при любом фиксированном составе смеси концентрация атомов F снижается в ряду $CF_4 - C_4F_8 - CHF_3$. Причиной этого является эффективная гибель атомов в объемных процессах вида $F + C_2F_4 \rightarrow CF_2 + CF_3$ и $F + CHF_x \rightarrow CF_x + HF$.

Установлено, что увеличение содержания гелия в смеси приводит к снижению скоростей травления Si и SiO_2 , которое полностью обеспечивается аналогичным поведением скорости гетерогенной химической реакции. Эффективная вероятность этой реакции (отношение скорости к плотности потока атомов фтора) зависит от соотношения Ag/He через изменение баланса процессов осаждения и де-струкции фторуглеродной полимерной пленки на обрабатываемой поверхности, определяющих ее толщину.

Литература

1. Wolf S., Tauber R. N. Silicon Processing for the VLSI Era. Vol. 1. Process Technology, New York: Lattice Press, 2000.

УДК 533.922, 533.924, 533.932

Исследование параметров плазмы и кинетики реактивно-ионного травления поликремния в смеси Cl_2/Ar

Оксаниченко Ф. В.^{1,2}, Ефремов А. М.²

¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Предложена модель процесса плазменного травления поликремния в смеси Cl_2/Ar . Модель обеспечивает взаимосвязанное описание физико-химических свойств плазмы и кинетики процессов на поверхности, таких как физическое распыление, спонтанная химическая реакция, ионно-стимулированная химическая реакция и переосаждение продуктов. Входными параметрами модели являются давление, мощность источника возбуждения плазмы, состав смеси и время травления. В результате расчета определяются параметры плазмы как источника активных частиц, а также выходные характеристики процесса травления: скорость, селективность, анизотропия и форма профиля.

Ключевые слова: индуктивно-связанная плазма; плазмохимическое травление; моделирование плазмы и плазменных процессов.

Одним из ключевых процессов микроэлектронной промышленности является травление, используемое в таких операциях, как очистка и структурирование поверхности различных функциональных слоев [1]. Существует два принципиальных вида травления: жидкостное и «сухое». Исторически первыми были разработаны и внедрены в технологию жидкостные методы, активная среда которых представляет водные растворы неорганических кислот или щелочей. Увеличение степени интеграции и уменьшение линейных размеров элементов интегральных микросхем (ИМС) привело к тому, что жидкостные методы перестали удовлетворять необходимым требованиям по равномерности, анизотропии и селективности процесса. Поэтому в настоящее время доминирующими являются плазменные методы травления, в которых образование химически активных частиц происходит в газовой фазе под действием электрического разряда. Одной из областей их применения является формирование поликремниевого затвора МДП-транзистора в хлоросодержащей плазме, в частности в смеси Cl_2/Ar . Так как данный элемент обладает минимальными физическими размерами на кристалле ИМС, именно требования данной операции задают общие требования к выходным характеристикам травления.

Особенностью плазменного травления является большое количество управляющих параметров, определяющих конечный результат процесса: давление, скорость потока газа, состава плазмообразующей смеси, вкладываемая мощность, величина потенциала подложки и др. Поэтому определение оптимального режима травления представляет собой сложную задачу, решение которой только экспериментальными методами является неэффективным, а иногда и невозможным. Поэтому актуальной задачей является разработка комплексных моделей травления, позволяющих предсказывать его результат в режиме численного эксперимента.

Целью нашей работы являлось создание такой модели для процесса травления поликристаллического кремния в смеси Cl_2/Ar .

В ходе выполнения работы была предложена комплексная модель, обеспечивающая взаимосвязанное описание физико-химических свойств плазмы и кинетики процессов на поверхности. Для описания плазмы как источника активных частиц использовалась 0-мерная модель, основанная на уравнениях баланса вкладываемой мощности, химической кинетики и квазинейтральности плазмы [2]. При записи уравнений химической кинетики учитывали три вида нейтральных частиц (Cl , Cl_2 , Ar) и четыре вида ионов (Cl^+ , Cl_2^+ , Ar^+ , Cl^-). Для описания процессов взаимодействия плазмы с поверхностью использовалась модель клеточного автомата [3]. В качестве процессов взаимодействия с поверхностью учитывались спонтанное и ионностимулированное травление, физическое распыление и пересаживание продуктов реакции [3].

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2002. — С. 413–413.
2. Hsu C. C. et al. Comparison of model and experiment for Ar, Ar/O₂ and Ar/O₂/Cl₂ inductively coupled plasmas // Journal of Physics D: Applied Physics, 2006. Vol. 39. № 15. P. 3272.
3. Mahorowala A. P., Sawin H. H. Etching of polysilicon in inductively coupled Cl₂ and HBr discharges. II. Simulation of profile evolution using cellular representation of feature composition and Monte Carlo computation of flux and surface kinetics // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement and Phenomena, 2002. Vol. 20. № 3. P. 1064–1076.



УДК 533.9.03

Влияние геометрии реактора на однородность осаждения алмаза методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на частоте 2,45 ГГц

Хозин Р. Р., Лещев Д. В., Горбачев Ю. Е.

ООО «Софт-Импакт»

194044, г. Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский просп., 64, лит. Е
rostislav.khozjin@softimpact.ru

Работа посвящена анализу влияния высоты держателя НРНТ-подложки на радиальный профиль осаждения алмаза методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Рассмотрены режимы работы реактора на частоте 2,45 ГГц в диапазоне мощностей 2–5 кВт, давлений 100–200 Торр в смеси 5% CH_4/H_2 .

Ключевые слова: плазма; электрическое поле; рост; алмаз.

Плазмохимическое осаждение из газовой фазы в смеси CH_4/H_2 является одним из перспективных методов получения алмазных покрытий для широкого спектра приложений. Установки плазмохимического осаждения спроектированы таким образом, чтобы энергия электромагнитной волны была локализована вблизи подложки, что позволяет обеспечить существование плотной СВЧ-плазмы. Локализация плазмы приводит к нагреву газа в камере реактора до 2500 °С и образованию над подложкой химически активных радикалов CH_3 и H , ответственных за рост алмазных покрытий. Однородность распределения потока частиц на подложку и, следовательно, скорости роста покрытий определяются пространственным распределением температуры газа, которая в свою очередь зависит от давления газа, поглощенной мощности в плазме и геометрических параметров реактора.

Данная работа посвящена исследованию влияния условий роста и геометрии реактора на однородность осаждения алмазных покрытий на подложках с диаметром 25 мм. В качестве метода исследований использовалось численное моделирование процесса плазмохимического осаждения, результаты которого были верифицированы при сравнении с экспериментальными данными [1]. На рис. 1 демонстрируется, как изменение геометрии реактора, а именно высоты молибденового держателя подложки, влияет на распределения электрического поля и концентрации плазмы при давлении в 120 Торр и мощности 5 кВт. Увеличение высоты держателя с 2,5 до 15 мм приводит к снижению пиковых значений модуля вектора напряженности электрического поля в центре подложки и его увеличению вблизи краев подложки. Так как ионизация экспоненциально зависит от величины электрического поля, то смещение пика электрического поля к краям подложки приводит к локализации скорости ионизации смеси газов и, следовательно, локальному повышению концентрации плазмы (рис. 1е). Таким образом, с увеличением высоты держателя пик плазмы смещается из центра на край подложки, что приводит к перераспределению джоулева тепловыделения в объеме реактора, а именно к убыванию тепловыделения в центральной области реактора.

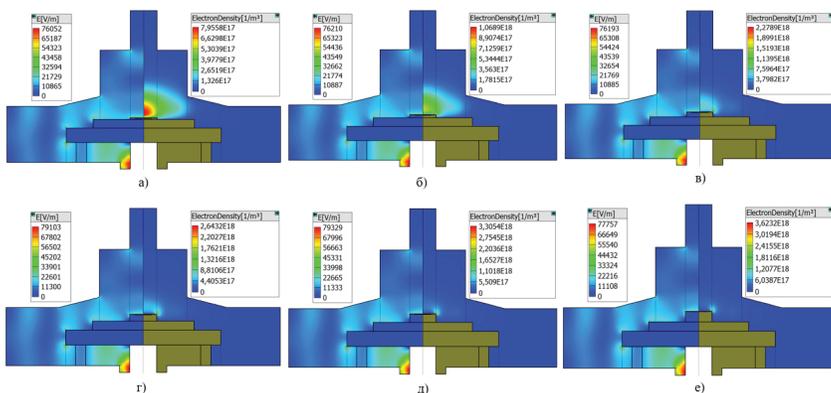


Рис. 1. Левая половина изображения — скалярное поле модуля вектора напряженности электрического поля, правая половина — поле концентрации плазмы в камере реактора (слева направо: а) 2,5, б) 5, в) 7,5, г) 10, д) 12,5, е) 15 мм)

Перераспределение концентрации плазмы и снижение температуры газа приводят к снижению скорости диссоциации молекул водорода и метана и, следовательно, к снижению пиковых значений мольной доли H и CH_3 над подложкой и перераспределению их в объеме реактора. На рис. 2 видно, что с увеличением высоты держателя мольная доля CH_3 снижается, формируется два пика — над подложкой и на периферии у боковых стенок реактора.

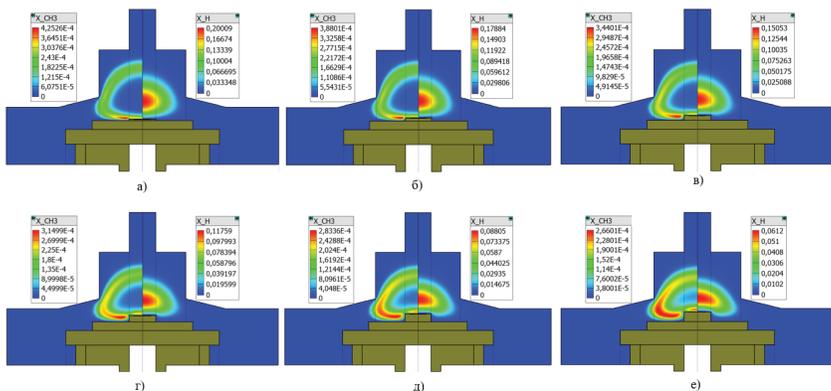


Рис. 2. Левая половина изображения — распределение мольной доли CH_3 , правая половина — распределение мольной доли H в камере реактора (слева направо: а) 2,5; б) 5; в) 7,5; г) 10; д) 12,5; е) 15 мм)

Перераспределение мольной доли радикалов в реакторе приводит к общему снижению скорости роста алмазного покрытия, смещению пика скорости роста из центра подложки на периферию, причем данный тренд от изменения высоты

держателя сохраняется для диапазона давлений 100–200 Торр и мощности 2–5 кВт (рис. 3).

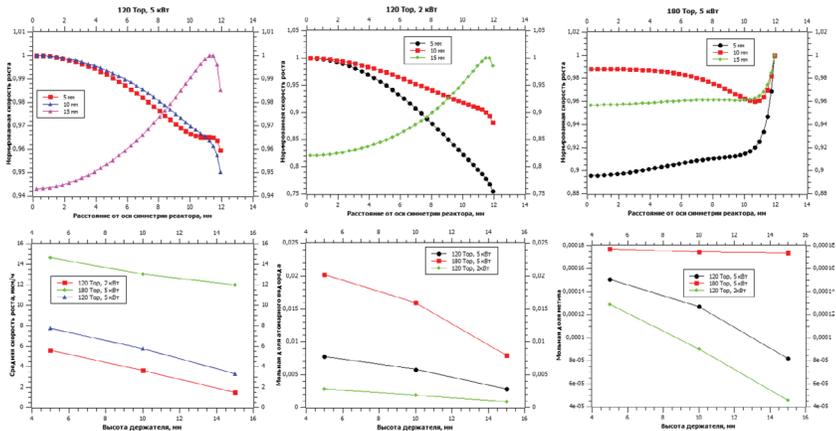


Рис. 3. Радиальные профили скорости роста алмаза, средние скорости роста покрытия, молярные H и CH_3 у подложки для разных условий проведения эксперимента (слева направо)

Согласованное изменение высоты держателя, давления и мощности позволяет менять распределение ключевых радикалов над подложкой, что отражается на радиальном профиле и скорости роста алмазного покрытия. В частности, повышенные давления до 180 Торр и мощности до 5 кВт при увеличении высоты держателя до 10 и 15 мм позволяет получить более однородный радиальный профиль роста с небольшим краевым эффектом на масштабе 1 мм от края подложки. При этом скорость роста покрытия увеличивается в два раза, что качественно согласуется с литературными данными о ростовых режимах с повышенным давлением и мощностью [2].

Автор считает, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: на основе анализа режимов работы реактора на частоте 2,45 ГГц показано влияние мощности, вложенной в СВЧ-плазму, давления газа в смеси 5% CH_4/H_2 и высоты держателя НРНТ-подложки на скорость и однородность роста алмазных покрытий. Определены оптимальные режимы роста и дизайн держателя, при которых наблюдается увеличение скорости роста в два раза при сопоставимой неоднородности по площади подложки.

Литература

1. Cuenca J.A. et al. Microwave plasma modelling in clamshell chemical vapour deposition diamond reactors // *Diamond and Related Materials*, 2022. Vol. 101. P. 108917.
2. Bolshakov A. P. et al. Single crystal diamond growth by MPCVD at subatmospheric pressures // *Diamond and Related Materials*, 2020. Vol. 101. P. 101635.



УДК 538.915

Исследование влияния кислородных вакансий на зонную структуру тонких пленок титаната бария с использованием методов теории функционала плотности

Левичев М. В., Андреева Н. В.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
mlevichev@etu.ru

Проведен расчет структуры тетрагональной фазы титаната бария с кислородной вакансией в рамках теории функционала плотности. Исследовано влияние дефектов на электрофизические характеристики структуры. Произведена оценка вклада кислородных вакансий в подвижность носителей в структуре титаната бария.

Ключевые слова: мемристор; титанат бария; теория функционала плотности; тонкие пленки.

Для увеличения вычислительного ресурса и снижения энергопотребления современных компьютеров можно использовать вычисления в памяти. Для успешной реализации этого подхода необходима новая электронная компонентная база — мемристор [1], который позволяет одновременно хранить данные и производить операции над ними.

Тонкие пленки титаната бария при определенных условиях демонстрируют явление резистивного переключения, аналогичное мемристивным эффектам в оксидной резистивной памяти (ReRAM). За проявление этих свойств в значительной степени отвечают кислородные вакансии, поверхностные эффекты, а также сегнетоэлектрическая поляризация. Так как экспериментальное определение концентрации вакансий в структуре затруднительно, для оценки их вклада в мемристивные эффекты можно использовать моделирование на основе первопринципных методов. К таким методам относится теория функционала плотности [2], суть которой состоит в описании свойств структуры на основе ее пространственного распределения электрического заряда.

В работе представлены результаты исследования влияния кислородных вакансий в различных положениях в кристаллической ячейке на зонную структуру и величину поляризации тетрагональной фазы титаната бария с использованием методов теории функционала плотности. Показано, что кислородная вакансия отвечает за формирование n -типа проводимости, а также значительное уменьшение величины сегнетоэлектрической поляризации в структуре титаната бария. В целях анализа механизмов транспорта носителей проведена оценка вклада кислородных вакансий в подвижность электронов в структуре тетрагональной фазы титаната бария.

Литература

1. Strukov D. V. et al. The missing memristor found // Nature, 2008. Vol. 453. № 7191. P. 80–83.
2. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas // Physical review, 1964. Vol. 136. № 3B. P. B864.



УДК 519.6

Использование уравнения Ландау — Лифшица для моделирования структур с магниторезистивными свойствами

Щербаков В. С., Абгарян К. К., д. ф.-м. н., Ревизников Д. Л., д. ф.-м. н.
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
basil-scherbakov@ya.ru

Доклад посвящен вопросам, связанным с применением уравнения Ландау — Лифшица для моделирования структур с магниторезистивными свойствами.

Ключевые слова: магнетизм; моделирование; спинтроника; магнитосопротивление; уравнение Ландау — Лифшица.

Уравнение Ландау — Лифшица является фундаментальным уравнением в физике, используемым для описания поведения магнитных материалов [1, 2]. Это уравнение описывает эволюцию магнитного момента во времени. Особый интерес данное уравнение представляет в связи с развитием энергонезависимых устройств хранения данных, к которым относится и MRAM — магниторезистивная память с произвольным доступом [3]. Принцип работы таких устройств основан на туннельном магнитосопротивлении — электрическом сопротивлении, возникающем на стыке двух ферромагнетиков, между которыми находится тонкий слой изолятора (диэлектрика). Поток электронов течет из одного ферромагнетика (закрепленного слоя) в антипараллельно ориентированный ферромагнетик (свободный слой), у которого при превышении указанного порога скачкообразно меняется намагниченность с возникновением параллельной конфигурации [3].

В контексте моделирования структур с магниторезистивными свойствами уравнение Ландау — Лифшица используется для предсказания поведения магнитных моментов в материалах, используемых в магниторезистивных устройствах. Различные вариации уравнения учитывают различные эффекты, такие как анизотропия, обменное взаимодействие и взаимодействие с электрическим полем [4]. Оно может быть использовано для моделирования процессов переключения магнитного состояния в магниторезистивной памяти.

В данной работе рассматриваются детали численного решения уравнения. Для решения использовался метод Рунге — Кутты четвертого порядка. Рассмотрено влияние различных факторов на изменение вектора намагниченности. Приведен анализ изменения вектора намагниченности при варьировании временного шага, консервативного и диссипативного слагаемых под воздействием внешнего поля и поля анизотропии.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда
(проект № 23-91-01012).*

Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. К теории магнитной проницаемости ферромагнитных тел // Л. Д. Ландау. Собрание трудов (в двух томах). — М.: Наука, 1972. — Т. I. — С. 128.



2. Apalkov D., Dieny B., Slaughter J. M. Magnetoresistive random access memory // Proceedings of the IEEE, 2016. Vol. 104. № 10. P. 1796–1830.
3. Степанов П. А. Моделирование энергонезависимой ячейки магнитной памяти // Научный журнал, 2016. — № 7 (8). — С. 6–9.
4. Garcia-Redondo F., Pranay Prabhat, Mudit Bhargava, Cyrille Dray. A Compact Model for Scalable MTJ Simulation // IEEE International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design, SMACD 2021.

УДК 621.382.323

Математическая модель для прогнозирования электрофизических характеристик GaAs НЕМТ на основе метода Монте-Карло

Карпов С. Н.

АО «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А. И. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
serge95a@mail.ru

Разработана математическая модель на основе метода Монте-Карло для описания транспорта электронов в GaAs НЕМТ. Проведена апробация модели, получено хорошее согласие с литературными данными. Проведено моделирование GaAs ДрНЕМТ, обнаружены колебания тока стока, обусловленные эффектом Ганна, при напряжениях затвор-исток от 0,2 В и сток-исток от 1,2 В.
Ключевые слова: GaAs НЕМТ; метод Монте-Карло; статические электрофизические характеристики; метод частиц.

Введение

В настоящее время при разработке НЕМТ большое внимание уделяется математическому моделированию. В ходе моделирования могут быть обнаружены новые физические эффекты, которые могут оказать значительное влияние на характеристики приборов. Наиболее точными для моделирования транзисторов являются модели на основе метода Монте-Карло, однако в открытом доступе таких моделей нет, поэтому разработка собственной математической модели представляет большой интерес.

Математическая модель

В основе модели лежит метод частиц, описанный в [1]. Алгоритм модели содержит следующие шаги:

- 1) раздача заряда в узлы сетки;
- 2) решение уравнения Пуассона и вычисление электрического поля;
- 3) движение частиц во внешнем поле в течение временного шага;
- 4) возврат к шагу 1.

Моделируемая область транзистора представлена на рис. 1.

Модели частицы представляют собой заряженные стержни с линейной плотностью заряда:

$$d\rho = \frac{q}{N} \iint N_d(x, y) dx dy,$$

где q — элементарный заряд; $N_d(x, y)$ — профиль легирования; N — количество частиц, используемых при моделировании.

Вычисление плотности заряда проводится по СИС-схеме:

$$\rho(x, y) = \frac{d\rho}{\Delta x \Delta y} \sum_{p=1}^N P\left(\frac{x - x_p}{\Delta x}\right) P\left(\frac{y - y_p}{\Delta y}\right),$$

где $P(z) = \begin{cases} 1 - |z|, & |z| \leq 1 \\ 0, & |z| > 1 \end{cases}$; $\Delta x, \Delta y$ — шаг сетки по оси X и Y ; (x_p, y_p) — координаты частицы.

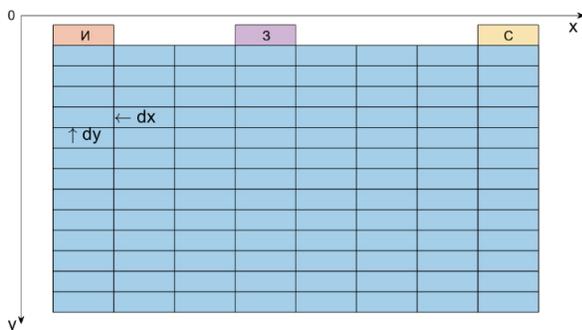


Рис. 1. Моделируемая область транзистора

Уравнение Пуассона решалось методом конечных разностей с помощью пяти-точечной аппроксимации. В электродных узлах задавались граничные условия 1-го рода, на всех остальных границах — условия 2-го рода. В области электродов истока и стока поддерживалась постоянная концентрация электронов, имитирующая омический контакт. Для вычисления напряженности электрического поля использовалась двухточечная аппроксимация.

Движение частиц во внешнем поле представляет собой попеременные свободные пролеты и рассеяние на одном из центров рассеяния. Зонная структура материала описывалась в трехдолинном приближении непараболических зон. Свободный пролет описывался схемой с перешагиванием:

$$r^{i+1} = r^i + \frac{V_r^{i+1} + V_r^i}{2} t,$$

$$V_r^i = \frac{\hbar k_r^i}{m(1 + 2\alpha W)},$$

$$k_r^{i+1} = k_r^i - \frac{qE_r t}{\hbar},$$

где r^i — координата x или y ; V_r^i — скорость по оси r ; α — коэффициент непараболичности; W — энергия; k_r^i — волновой вектор; t — время свободного пролета; E_r — напряженность электрического поля.

Интеграл столкновений рассматривался в приближении времен релаксации. Учитывалось рассеяние на акустических, полярных оптических и междолинных фонах, рассеяние на ионизированных примесях, а также рассеяние на несогласованностях решетки для тройных соединений. Алгоритм выбора времени пролета и рассеяния описан в [2].

Апробация модели

Для проверки адекватности модели было проведено моделирование транзисторов с конструкциями, взятыми из литературы [3]. Получено хорошее согласие результатов моделирования.

Проведено моделирование характеристик GaAs НЕМТ с конструкцией, представленной на рис. 2а. Было получено семейство ВАХ (рис. 2б), на которых видны участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Модель позволяет исследовать зависимость $I(t)$. Анализ показал, что для рабочих точек в области ОДС наблюдаются колебания тока стока. Зависимость $I(t)$ при $U_{gs} = 0,7$ В, $U_{ds} = 3$ В представлена на рис. 3. Анализ литературы показал, что наблюдаемые колебания связаны с эффектом Ганна.

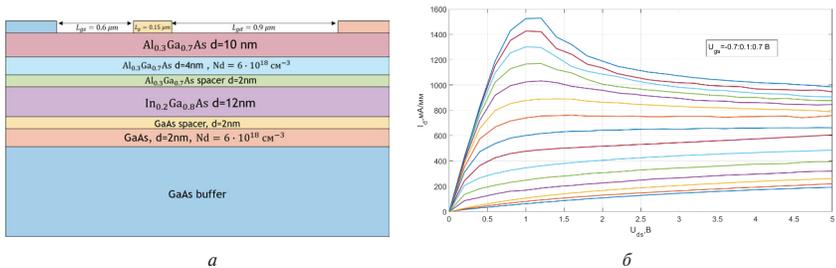


Рис. 2. GaAs НЕМТ: а) структура транзистора; б) семейство ВАХ GaAs НЕМТ

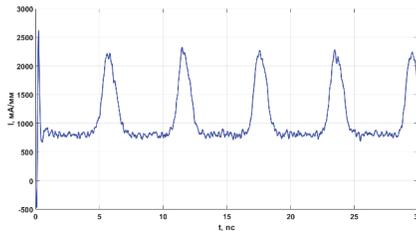


Рис. 3. Зависимость $I(t)$ при $U_{gs} = 0,7$ В, $U_{ds} = 3$ В

Заключение

Разработана математическая модель для прогнозирования характеристик GaAs НЕМТ. Результаты моделирования находятся в хорошем согласии с литературными данными. Показано, что модель может быть использована для наблюдения различных физических эффектов, протекающих внутри транзисторов, и дальнейшей оптимизации их характеристик.

Литература

1. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц: Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 640 с.
2. Goodnick S., Valeska D. Computational Electronics: Morgan & Claypool Publishers, 2006. 208 p.
3. Yoshida J., Kurata M. Analysis of high electron mobility transistors based on a two-dimensional numerical model // IEEE electron device letters, 1984. Vol. 5. № 12. P. 508–510.



УДК 621.382.323

Особенности моделирования НЕМТ-транзистора на основе гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN со спейсерным слоем AlN

Неволина Т. Н., Рыжук Р. В., к. т. н., Цунваза Д., Гусев А. С., к. ф.-м. н.,
Каргин Н. И., д. т. н., Захарченко Р. В., к. т. н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

t_nevolina@inbox.ru

Исследованы особенности TCAD-моделирования гетероэпитаксиальных НЕМТ-структур на основе AlInN. Указаны особенности описания ультратонкого слоя AlN в структуре, а также его влияние на электрофизические характеристики транзистора. Рассмотрено влияние полевой пластины на величину напряжения пробоя.

Ключевые слова: НЕМТ; TCAD; напряжение пробоя; полевая пластина; ультратонкий AlN.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе гетероструктур AlGaN/GaN перспективны в качестве элементной базы для применения в СВЧ и силовой электронике благодаря особым свойствам нитридов III группы (широкая запрещенная зона, высокое поле пробоя). При создании электронных устройств необходимо учитывать ряд важных факторов, влияющих на характеристики устройства. Для силовых транзисторов увеличение напряжения пробоя является одной из ключевых задач при их разработке, поэтому необходимо изучение механизмов пробоя и нахождение оптимальных решений в проектировании для повышения надежности и эффективности устройства [1].

Важным этапом в процессе проектирования является моделирование, которое позволяет точно предсказать электрофизические характеристики транзисторов до их фактического изготовления. Создание таких моделей позволяет разработчикам прогнозировать поведение устройства в различных условиях, оптимизировать их параметры и повышать производительность конечных устройств.

В среде Silvaco Atlas была смоделирована структура НЕМТ-транзистора, включающая пассивирующий слой SiO₂, сар-слой GaN, барьерный слой AlGaN, спейсерный слой AlN 1 нм, буферный слой GaN и зародышевый слой AlN. Для расчета структуры транзистора были использованы модели Шокли—Рида—Холла и Оже-рекомбинации. Для описания распределения частиц по состояниям энергии использовалась статистика Ферми—Дирака. Для подвижности была выбрана модель FLDMOV (учитывает зависимость от поля) и модель ALBRCT. Особое внимание было уделено заданию спейсерного AlN и учету поляризационных эффектов, характерных для AlGaN/GaN. Поляризация (спонтанная и пьезоэлектрическая) в материалах учитывается посредством задания заряда на границе слоев. Данный способ является предпочтительным перед использованием модуля polarization в Silvaco Atlas, позволяя корректно описать 2DEG в канале транзистора и исключить проблемы со сходимостью при расчетах.

Слой AlN между AlGaN и GaN вводится для уменьшения рассеяния носителей на гетерогранице, при этом сохраняется высокая концентрация 2DEG в канале. Для анализа влияния толщины слоя AlN на 2DEG в канале были построены



энергетические зонные диаграммы для различных значений толщин. Оптимальная толщина слоя AlN составляла 1 нм, что соответствует литературным данным [2].

Для увеличения напряжения пробоя в модель была добавлена полевая пластина (электрод над затвором для управления распределением электрического поля) из-за относительной простоты интеграции в существующие производственные процессы и гибкости в проектировании [3]. Было исследовано влияние длины пластины на ток стока и напряжение пробоя. Показано, что имеется пиковое значение длины полевой пластины, при котором напряжение пробоя максимально. Дальнейшее увеличение длины пластины приводит к росту емкости затвора, что снижает характеристики транзистора.

В работе исследованы особенности TCAD-моделирования гетероэпитаксиальных HEMT-структур на основе AlGaIn/GaN, учитывая особенности задания ультратонкого слоя AlN и поляризационных эффектов. Показано, что использование слоя AlN 1 нм на границе AlGaIn/GaN позволяет снизить рассеяние носителей. Применение полевой пластины приводит к увеличению значения напряжения пробоя, при этом существует оптимальная длина пластины, при которой напряжение пробоя максимально. Полученная модель может быть использована при разработке силовых транзисторов на основе нитридов III группы.

Работа выполнена в рамках проекта № FSWU-2023-0088.

Литература

1. Research Progress in Breakdown Enhancement for GaN-Based High-Electron-Mobility Transistors // *Electronics*, 2021. Vol. 12. № 21. P. 4435.
2. Balmer R. S. et al. Analysis of thin AlN carrier exclusion layers in AlGaIn/GaN microwave heterojunction field-effect transistors // *Semiconductor science and technology*, 2004. Vol. 19. № 6. P. L65.
3. Shi N. et al. Optimization AlGaIn/GaN HEMT with field plate structures // *Micromachines*, 2022. Vol. 13. № 5. P. 702.



УДК 621.382.323

Разработка системы генерации данных для системы Machine Learning TCAD

Бабурин А. И., Силкин Д. С., к. т. н., Попов Д. А., к. т. н., Пригородов Р. А., Яковлева Е. Д.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
da.popov@hse.ru

Разработан демонстратор инструмента автоматизации сбора датасета для полупроводниковых структур. Проведено обучение нейронной сети для прогнозирования электрических характеристик МОП- и биполярных транзисторов на основе данных, полученных с помощью системы приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD. Получены и проанализированы предсказанные характеристики рассматриваемых полупроводниковых структур.

Ключевые слова: МОП-транзистор; биполярный транзистор; машинное обучение; датасет; TCAD.

Введение

Системы приборно-технологического моделирования (TCAD) позволяют разрабатывать конструкцию и технологию производства полупроводниковых приборов. В основе работы таких систем лежит моделирование физических процессов переноса носителей заряда в материале с учетом типа материала, его легирования, зонной и кристаллографической структуры и т. п. При проведении расчетов полупроводников структур TCAD составляет систему уравнений, включающую сотни тысяч уравнений для расчета физических параметров в каждой точке структуры. Решение таких систем требует значительных затрат времени и вычислительных ресурсов. Для упрощения решения таких задач предлагается использовать средства машинного обучения. Нейронная сеть, обученная на большом объеме собранных данных о влиянии физических параметров структуры на электрические характеристики прибора, значительно ускоряет решение таких типовых задач. Работы в этой области, проводимые зарубежными учеными [1, 2], показывают, что обучение нейронной сети с помощью набора данных от 1 000 записей требуется, чтобы получить приемлемую точность совпадения прогнозов нейронной сети с результатами моделирования непосредственно в TCAD.

Демонстратор ML-TCAD Demo

Работа с системой осуществляется через разработанный демонстратор ML-TCAD Demo (рис. 1), состоящий из следующих разделов:

- 1) функция генерации датасета входных параметров требуемых полупроводниковых приборов в заданном диапазоне значений для выгрузки их в подготовленный проект программы Sentaugus TCAD;
- 2) функция обучения нейросети с выбором количества данных для обучения и выбором типа транзистора для правильного отображения наименований осей генерируемых характеристик;

- 3) функция тестирования нейронной сети на подготовленных файлах входных параметров выходных характеристик транзистора;
- 4) функция предсказания характеристик транзистора в заданном диапазоне значений.

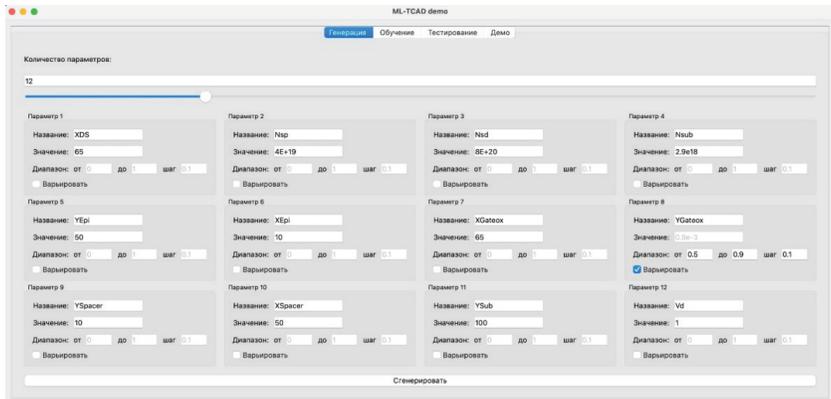


Рис. 1. Вкладка «Генерация» приложения (ML-TCAD Demo)

Формирование датасета для обучения нейронной сети

По результатам расчетов Sentaurus TCAD были получены входные и выходные характеристики для 1000 вариантов структуры МОП-транзистора и 1000 вариантов структуры биполярного транзистора, отличающихся физическими параметрами структуры. Данные характеристики использовались в качестве датасета входных и выходных параметров, пригодных для обучения нейросети.

Обучение нейронной сети

На основе полученного датасета входных и выходных параметров рассматриваемых полупроводниковых структур было проведено обучение на разном объеме выбранных параметров, где видно, как менялась точность предсказания от выборки к выборке с увеличением количества посчитанных структур транзистора (рис. 2 и 3).

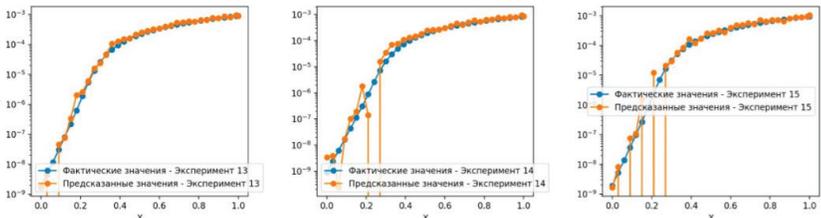


Рис. 2. Тестирование нейросети на 100 просчитанных структурах МОП-транзистора

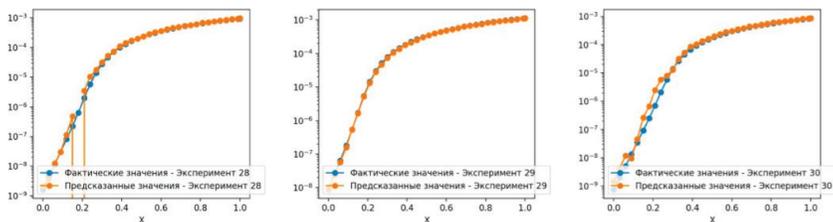


Рис. 3. Тестирование нейросети на 400 просчитанных структурах МОП-транзистора

После обучения на полном наборе датасета была достигнута точность 99,9% (рис. 4) при изменении параметров для МОП-транзистора и биполярного транзистора.

Mean Absolute Error (MAE): 1.906456037708628e-06
 Mean Squared Error (MSE): 8.752977248419588e-12
 R2 Score: 0.9999295821163875

Рис. 4. Параметры точности предсказания отлаженной нейросети

Заключение

В работе разработан демонстратор инструмента автоматизации сбора датасета для полупроводниковых структур. С использованием демонстратора проведена отработка процедуры сбора датасета входных и выходных параметров в количестве 1 000 для МОП- и для биполярного транзистора в количестве 1 000, что является достаточным для достижения высокой точности и скорости предсказаний. Точность предсказания характеристик транзисторов по результатам обучения нейросети составила 99,9%.

Литература

1. Ghoshhajra R., Biswas K., Sarkar A. Device Performance Prediction of Nanoscale Junctionless FinFET Using MISO Artificial Neural Network // Silicon, 2022. Vol. 14. P. 8141–8150.
2. Mehta K., Raju S. S., Xiao M., Wang B., Zhang Y., Wong H. Y. Improvement of TCAD Augmented Machine Learning Using Autoencoder for Semiconductor Variation Identification and Inverse Design // IEEE Access, 2020. Vol. 8. P. 143519–143529.

УДК 621.3.049

Эффект аутдиффузии примеси из приповерхностного слоя полупроводника при моделировании в TCAD термических процессов в среде, содержащей кислород

Федотов А. В.*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
avfed05@mail.ru*

При моделировании в TCAD термических процессов в среде, содержащей кислород, возникает ложный эффект аутдиффузии примеси: концентрация примеси в приповерхностных слоях сильно сокращается, из полупроводника уходит значительная доза примеси. Такая картина не соответствует экспериментальным данным. В работе проанализирована степень проявления этого эффекта при моделировании и описаны рекомендации по корректному моделированию термических процессов в TCAD.

Ключевые слова: Sentaurus TCAD; термический отжиг; моделирование; диффузия; аутдиффузия.

Профили распределения примесей оказывают определяющее влияние на электрофизические характеристики приборов. При проектировании и моделировании устройств в приборно-технологическом программном обеспечении Sentaurus TCAD важно воспроизводить корректные профили распределения.

В модуле SProcess в ПО Sentaurus TCAD реализовано множество моделей термической диффузии примеси [1]. Однако обнаружено, что при моделировании термических процессов в среде, содержащей кислород, при использовании любой модели возникает паразитный эффект аутдиффузии примеси из приповерхностных слоев полупроводника. Данный эффект характеризуется тем, что концентрация примеси в приповерхностных слоях сильно сокращается, из полупроводника уходит значительная доза примеси. При этом доза примеси, которая попадает в тонкую пленку вырастающего термического окисла, значительно меньше ушедшей дозы. Таким образом, в результате паразитного эффекта аутдиффузии из структуры уходит доза примеси, которая не компенсируется в других слоях. Величина уходящей из приповерхностных слоев дозы составляет до 50 % от исходной.

Такая картина, возникающая при моделировании со стандартными моделями диффузии и окисления в TCAD, не соответствует экспериментальным данным: результаты ВИМС-анализа тестовых структур демонстрируют отсутствие такого эффекта.

В данной работе описано проявление эффекта аутдиффузии и показаны условия его возникновения. Продемонстрировано сопоставление моделируемых результатов с экспериментальными данными и описаны рекомендации по моделированию термических процессов в TCAD, позволяющие избежать данного эффекта.

Литература

1. Sentaurus Process User Guide. Version H-2013.03, March 2013.



УДК 004.94

Численное моделирование процесса резистивного переключения элемента энергонезависимой памяти на основе технологии ReRAM

Журавлев А. А., Абгарян К. К., д. ф.-м. н., Ревизников Д. Л., д. ф.-м. н.
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, к. 2
zhuravlyov.andrei@gmail.com, kristal83@mail.ru, reviznikov@gmail.com

Для исследования процессов, происходящих в ходе переключения элемента ReRAM, используется комплексная математическая модель, состоящая из уравнения дрейфа-диффузии ионов, уравнения электропроводности и уравнения теплопроводности с источником слагаемым в виде джоулева тепла. Так как уравнения модели взаимосвязаны, задача рассматривается в сопряженной постановке. В работе представляется подход к численному решению данной задачи. Используется конечно-объемная аппроксимация уравнений на динамически адаптируемой к особенностям решения разностной сетке. Получение самосогласованного решения достигается с помощью глобальных итераций. Результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: математическое моделирование; дрейф-диффузионная модель; ReRAM; мемристор.

Переключение мемристивного элемента между различными состояниями связано с формированием проводящих филаментарных структур. Такие структуры могут образовываться за счет обеднения оксидной пленки ионами кислорода с образованием большого числа кислородных вакансий либо полным превращением оксида в чистый металл. В процессе переключения электропроводность и теплопроводность моделируемого элемента существенно изменяются в зависимости от концентрации ионов.

Для моделирования процесса переключения мемристивных элементов могут использоваться различные подходы [1–3]. В данной работе для исследования процессов, происходящих при переключении элемента ReRAM, используется комплексная математическая модель, состоящая из уравнений дрейфа-диффузии для подвижных частиц (ионов), уравнения электропроводности и уравнения теплопроводности с источником слагаемым в виде джоулева тепла. При этом уравнения электропроводности и теплопроводности рассматриваются в квазистационарной постановке, тогда как концентрация подвижных частиц эволюционирует во времени.

В рамках данной модели предполагается, что подвижные частицы, отвечающие за проводимость материала, движутся вследствие диффузии, происходящей за счет хаотического теплового движения атомов, и дрейфа, вызванного приложением к ячейке внешнего напряжения.

Коэффициент электропроводности зависит от концентрации проводящих частиц и температуры, в простейшем случае он может являться интерполяцией коэффициентов электропроводности двух состояний исследуемого материала.

При этом для малых концентраций проводящей фазы используется дополнительный барьер активации тока, который позволяет улучшить совпадение результатов в низкопроводящем состоянии ячейки.

Коэффициент теплопроводности может зависеть от концентрации проводящих частиц и температуры, он также может определяться интерполяцией коэффициентов теплопроводности двух состояний исследуемого материала.

Уравнения модели взаимосвязаны. Коэффициент диффузии и скорость дрейфа в уравнении для концентрации ионов существенно зависят от температуры, которая определяется уравнением теплопроводности, где коэффициент теплопроводности зависит от концентрации ионов, а правая часть зависит от протекающего тока. Плотность тока в ячейке определяется уравнением электропроводности, в котором коэффициент электропроводности зависит от концентрации ионов и температуры. Для получения самосогласованного решения уравнений ионной динамики на каждом временном шаге требуется организация специального итерационного процесса. В дальнейшем будем называть такие итерации глобальными, тогда как итерации, используемые для решения каждого из уравнений по отдельности, будем называть локальными. Таким образом, в общей вычислительной схеме в ходе временного цикла на каждом шаге по времени в рамках глобального итерационного процесса, объединяющего решение уравнений, осуществляются локальные итерационные процессы. В процессе моделирования в решениях часто возникают области с высокими локальными перепадами концентраций, что требует использования достаточно мелких сеток, однако повсеместное измельчение сеток приводит к существенным вычислительным затратам. Для уменьшения вычислительных затрат решение уравнений производится на адаптивной сетке, которая подстраивается под особенности решения, локально измельчаясь в областях с высокими градиентами решений и обратно укрупняясь при сглаживании решения.

Вычислительные эксперименты, проведенные с использованием описанной модели, показали хорошее согласование с имеющимися экспериментальными данными.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда
(проект № 23-91-01012).*

Литература

1. Zhuravlev A. A., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Multiscale Modeling of Ion Dynamics in Memristive Elements // *Physica status solidi (b)*, 2022. Vol. 259. № 11. P. 2200151.
2. Sadi T. et al. Investigation of resistance switching in SiO₂ RRAM cells using a 3D multi-scale kinetic Monte Carlo simulator // *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2018. Vol. 30. № 8. P. 084005.
3. Larentis S. et al. Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM—Part II: Modeling // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012. Vol. 59. № 9. P. 2468–2475.



УДК 004.052.2

Определение объема аппаратной избыточности, вводимой в целях повышения отказоустойчивости матриц памяти ReRAM

Петрова С. И.^{1,2}, Теплов Г. С.^{1,2}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А

В работе построена математическая модель, позволяющая получить статистику возникновения ошибок в матрицах памяти ячеек ReRAM. Разработан алгоритм, позволяющий оценить необходимый объем аппаратной избыточности для предотвращения отказов матриц на заданном ресурсе. Оптимизирован способ введения аппаратной избыточности.

Ключевые слова: ReRAM; матрицы памяти; аппаратная избыточность.

В настоящее время исследовательскими технологиями энергонезависимой памяти ReRAM обладают порядка десятка компаний во всем мире [1], однако переход к коммерческим технологическим решениям на основе данного типа памяти затруднен. Одним из основных препятствий на пути внедрения технологии ReRAM является ее низкая повторяемость характеристик от устройства к устройству, в том числе по количеству операций записи. Повышение отказоустойчивости памяти ReRAM при наличии разброса данного параметра является одним из необходимых условий перевода технологии ReRAM из экспериментальной в промышленную. Одним из возможных методов решения данной задачи является применение аппаратной избыточности, которое можно реализовать посредством использования самокорректирующихся кодов и введения дополнительных слов для матриц памяти.

В рамках данной работы для матриц размерами 1, 4 и 16 Кбит с выходом годных 95 и 99,7 %, каждая из которых разбита на слова по 8, 16 и 32 бит, была построена математическая модель, для которой методом Монте-Карло [2] была получена статистика возникновения ошибок в матрицах памяти, на основе которой произведен расчет вероятностей возникновения ошибок в словах матрицы. Под процентом выхода годных в данном случае понимается процент ячеек, переключающихся в соответствии со своей спецификацией. Основываясь на полученных результатах, был произведен повторный расчет вероятностей с учетом добавления избыточных слов и использования кода Соломона — Рида — одного из типов самокорректирующихся кодов [3]. По итогам проведения повторного расчета были выделены наиболее оптимальные способы введения аппаратной избыточности для каждого из вариантов построения матриц, при которых для исправления возникающих ошибок происходит минимальное увеличение матрицы памяти. Результаты повторного расчета в этих случаях приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Результаты повторного расчета для матриц с выходом годных 99,7% для оптимальных по увеличению матрицы случаев

Длина первоначального слова	Количество ошибок, исправляемых самокорректирующимся кодом	Количество необходимых дополнительных слов	Итог по затраченным битам	Увеличение матрицы относительно первоначального размера
Матрица 1 Кбит				
8 бит	0	5	1056	1,03
16 бит	0	4	1088	1,06
32 бита	0	4	1152	1,13
Матрица 4 Кбит				
8 бит	0	13	4200	1,03
16 бит	0	13	4304	1,05
32 бита	1	3	4454	1,09
Матрица 16 Кбит				
8 бит	0	50	16784	1,02
16 бит	0	51	17200	1,05
32 бита	1	6	17612	1,07

Таблица 2. Результаты повторного расчета для матриц с выходом годных 95% для оптимальных по увеличению матрицы случаев

Длина первоначального слова	Количество ошибок, исправляемых самокорректирующимся кодом	Количество необходимых дополнительных слов	Итог по затраченным битам	Увеличение матрицы относительно первоначального размера
Матрица 1 Кбит				
8 бит	0	68	1568	1,53
16 бит	3	9	1606	1,57
32 бита	7	3	1610	1,57
Матрица 4 Кбит				
8 бит	1	77	5890	1,44
16 бит	3	19	6050	1,48
32 бита	5	14	5964	1,46
Матрица 16 Кбит				
8 бит	1	260	23080	1,41
16 бит	2	121	22900	1,40
32 бита	5	29	22722	1,39



Таким образом, при выходе годных ячеек 99,7% увеличение матриц в оптимальном случае происходит в пределах от 2 до 13%, а для матриц с выходом годных 95% — от 39 до 57%. Также установлено, что с увеличением длины слова растет эффективность использования самокорректирующегося кода. Таким образом, для более коротких слов наименьшее относительное увеличение размера матрицы наблюдается в случае, при котором превалирует количество битов, затраченных на введенные избыточные слова. А при удлинении слова наибольший вклад в избыточность начинают вносить биты, вводимые для использования самокорректирующегося кода.

Литература

1. Choe J. Memory technology 2021: Trends & challenges // 2021 international conference on simulation of semiconductor processes and devices (SISPAD). IEEE, 2021. P. 111–115.
2. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. — М.: Наука, 1968.
3. Ghosh S. Guaranteeing fault tolerance through scheduling in real-time systems: дис. University of Pittsburgh, 1996.



УДК 537.311.322

Исследование контактных явлений в многослойных фотоэлектрических преобразователях на кристаллических и неупорядоченных полупроводниках

Полагин М. В., Мишустин В. Г.

*Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
meowpolagin@yandex.ru*

В работе рассмотрены многокаскадные фотоэлектрические преобразователи на основе различных полупроводниковых материалов. Проведено моделирование электрофизических характеристик двухкаскадного тонкопленочного фотоэлектрического преобразователя на основе $a\text{-Si:H}$ и $a\text{-SiC:H}$. Разработана физическая модель фотоэлектрического преобразователя и предложен алгоритм расчета его характеристик. Результаты моделирования могут быть использованы для оптимизации конструкции фотоэлектрических преобразователей в целях повышения их эффективности.

Ключевые слова: многокаскадные фотоэлектрические преобразователи; неупорядоченные полупроводники; $p\text{-i-n}$ -структура; электрофизические свойства; вольт-амперные характеристики.

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) занимают определенную нишу в электроэнергетике и обладают хорошими перспективами дальнейшего развития. Особенно актуально их применение в труднодоступных местах, где нет возможности или экономической целесообразности прокладки линий электропередач. В случае космического применения они являются фактически безальтернативными источниками энергии.

Перспективное направление развития ФЭП — это использование неупорядоченных полупроводников. Они обладают такими преимуществами, как радиационная стойкость, возможность напыления на искривленные поверхности большой площади, низкотемпературный технологический процесс, относительно невысокая стоимость. Ограничение данной технологии — невысокий относительно кристаллических полупроводников коэффициент полезного действия. Очевидный способ преодолеть это ограничение — использование многокаскадных тонкопленочных ФЭП на основе неупорядоченных полупроводников, обладающих разной шириной запрещенной зоны, что позволяет расширить спектр поглощаемого излучения.

В данной работе проводится исследование контактных явлений в многослойных ФЭП на основе неупорядоченных полупроводников. Рассматриваются основные физические процессы, протекающие в контактах металл — полупроводник, а также полупроводник — полупроводник. На основе физических моделей, описывающих контактные явления, разработано программное обеспечение для расчета вольт-амперных характеристик двухкаскадных солнечных элементов на основе системы $a\text{-Si:H}/a\text{-SiC:H}$. Это необходимо для проведения работ по улучшению КПД серийно производимых фотоэлектрических преобразователей, а также разработки новых перспективных конструкций. Численное моделирование ВАХ является



более быстрым, гибким и недорогим способом обработки конструкции и технологии производства ФЭП по сравнению с реальным экспериментом.

На основании анализа литературных данных выбраны структура, материалы и модель для разработки программы. В программе MatLab реализован алгоритм для численного моделирования двухкаскадного ФЭП на основе a-Si:H и a-SiC:H. Модель для расчета разработана специально для многослойных ФЭП на основе неупорядоченных полупроводников. Она базируется на уравнениях для расчета фототока и темнового тока p-i-n-перехода, учитывающих особенности электрофизических характеристик неупорядоченных полупроводников. На основе предложенной модели проведен расчет основных параметров и характеристик многокаскадного фотоэлектрического преобразователя с p-i-n-структурой на основе a-Si:H и a-SiC:H.

Данная работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В. Ф. Уткина.



УДК 621.383.51

Расчетно-экспериментальная оценка срока службы солнечных элементов в заданных радиационных условиях

Степанов М. А.

АО «МИКРОН»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Основной целью исследования является изучение влияния радиационных факторов на долговечность и эффективность работы солнечных элементов. На основе полученных результатов проведена расчетно-экспериментальная оценка срока службы солнечных элементов в заданных радиационных условиях.

Ключевые слова: солнечный элемент; радиационная стойкость; моделирование; срок службы.

Воздействие ионизирующих излучений космического пространства приводит к деградации характеристик солнечных элементов [1].

В работе применяется комплексный подход, который включает анализ радиационных условий, литературный обзор и изучение существующих методик, разработку расчетных моделей, проведение экспериментов и анализ результатов. В работе используется специализированная аппаратура, включая солнечные симуляторы, измерительные приборы, климатическую аппаратуру, а также расчетные модели и программное обеспечение для моделирования и анализа данных. Ожидаемыми результатами исследования являются оценка срока службы солнечных элементов в заданных радиационных условиях, анализ факторов, влияющих на их деградацию, и формулирование рекомендаций по улучшению долговечности и эффективности работы солнечных элементов.

Представлено исследование деградации характеристик однопереходных гетероструктурных GaAs/Ge солнечных элементов. Описана методика исследования, которая включает облучение солнечных элементов различными флюенсами быстрых нейтронов в специально созданных радиационных условиях. Далее было проведено измерение световых вольт-амперных характеристик солнечных элементов до и после облучения, а также анализ полученных данных. Результаты экспериментов позволяют оценить степень деградации характеристик солнечных элементов под воздействием радиации. На основе полученных результатов проведена расчетно-экспериментальная оценка срока службы солнечных элементов в заданных радиационных условиях. Для этого использованы методы моделирования деградации солнечных элементов, такие как метод JPL и метод NRL [2].

Результаты и выводы работы могут быть полезными для разработки и оптимизации солнечных энергетических систем, а также для принятия решений в области использования солнечной энергии в различных климатических и радиационных условиях.

Литература

1. Таперо К. И., Диденко С. И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники. Уч. пособие. — М.: изд. дом МИСиС, 2013.
2. Messenger S. R., Summers G. P. Modeling solar cell degradation in space: A comparison of the NRL displacement damage dose and the JPL equivalent fluence approaches. 2000.



УДК 681.7.069

Прогнозирование электрических параметров кремниевых солнечных элементов на низкой околоземной орбите

Феклистова А. А.^{1,2}, Рябцева М. В.¹, Чуянова Е. С.^{1,2}, Вагапова Н. Т.^{1,2}

¹ АО «НПП «Квант»

129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 16

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

feklistova_aa@npp-kvant.ru

Рассмотрена полупроводниковая структура Si солнечного элемента (СЭ) космического назначения. Представлены результаты моделирования деградации Si СЭ в результате воздействия электронов с энергией 1 МэВ с флюенсом, эквивалентным пяти годам эксплуатации на орбите: $I_{\text{кз}}$ уменьшилось на 97,8%, а U_{xx} — на 93,4%.

Ключевые слова: ионизирующее излучение; солнечный элемент; полупроводниковые материалы; моделирование; космические аппараты.

Основным источником энергообеспечения космических аппаратов (КА) и станций является батарея солнечная (БС), фотогенирующая часть которой состоит из солнечных элементов (СЭ). Для низкоорбитальных КА (400–2000 км), таких как «Метеор-М», «Электро-Л», «Арктика-М», основным материалом СЭ является кремний (Si), который хорошо изучен и имеет качественную отработанную технологию производства, а также невысокую стоимость в сравнении с другими полупроводниковыми материалами.

В качестве объекта исследования был рассмотрен Si СЭ (рис. 1). Особого внимания заслуживает использование СЭ с базой *p*-типа, так как, например, при облучении СЭ электронами малых энергий 0,3–1 МэВ отношение коэффициентов электронного повреждения *n*- к *p*-типу равняется 30–100, что говорит о большем возникновении центров рекомбинации именно в Si *n*-типа.

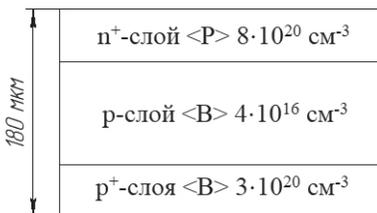


Рис. 1. Схематическое изображение структуры исследуемого ФЭП

В космическом пространстве существует большое количество факторов, которые влияют на выходные характеристики СЭ и БС в целом, например ионизирующее излучение, микрометеориты, электростатические разряды, атомарный кислород и т. д.

Известно, что ионизирующим излучением (ИИ) называется любое излучение, которое прямо или косвенно ионизирует среду, в которой оно взаимодействует. Каждый

вид излучения характеризуется типом частицы (зарядом, массой, энергией) относительно взаимодействующей среды и плотностью потока частиц (флюенсом).

Существует два основных принципа взаимодействия ИИ: структурные нарушения, возникающие в результате смещения и перестройки атомов в твердом теле, и эффекты ионизации, которые возникают при реакции между ядром и бомбардируемыми частицами. В структуре СЭ в основном встречается первый вид дефектов, который в зависимости от величины флюенса подразделяется на междоузельные дефекты (Френкеля, Шоттки), линейные дефекты и т. д.

Эти атомные смещения, которые нарушают периодическую структуру решеток полупроводниковых материалов, препятствуют движению неосновных носителей заряда (НЗ), что приводит к уменьшению времени жизни НЗ и, соответственно, диффузионной длины НЗ, что описывается формулой

$$\frac{1}{L_0^2} - \frac{1}{L_\phi^2} = K_L \phi, \quad (1)$$

где L_0 и L_ϕ — диффузионная длина неосновных НЗ (0 до и ϕ после облучения соответственно), см; K_L — коэффициент повреждения; ϕ — накопленный флюенс электронов, см⁻².

Соответственно, в результате моделирования были получены деградационные кривые [2], на основе которых можно рассчитать относительное изменение тока короткого замыкания ($I_{кз}$) и напряжения холостого хода ($U_{хх}$), равных в начале срока активного существования (САС) 44,02 мА/см² и 584,65 мВ соответственно. Из [3] известно, что эквивалентный поток электронов 1 МэВ на низкой околоземной орбите составляет $3,78 \cdot 10^{11}$ электрон/см²·год (табл. 1).

Таблица 1. Относительная деградация электрических параметров СЭ

САС, лет	Эквивалентный поток, электрон/см ²	$I_{кз}/I_{кз0}$, отн. ед	$U_{хх}/U_{хх0}$, отн. ед
2	$7,6 \cdot 10^{11}$	0,98	0,97
5	$1,9 \cdot 10^{12}$	0,97	0,93

Известно, что в спецификации на схожие кремниевые СЭ марки Azur Space указано, что при флюенсе $3,0 \cdot 10^{14}$ электрон/см² относительное изменение $U_{хх}$ составляет 0,91, а $I_{кз}$ — 0,88, что говорит о том, что полученные смоделированные данные сопоставимы с существующей статистикой, экспериментально подтвержденной крупными производителями СЭ.

Литература

1. Cappelletti M. A. et al. Theoretical study of the maximum power point of n-type and p-type crystalline silicon space solar cells // Semiconductor science and technology, 2013. Vol. 28. № 4. P. 045010.
2. Феклистова А. А., Рябцева М. В., Чуянова Е. С. Моделирование деградационных кривых электрических параметров облученных фотоэлектрических преобразователей на основе кремния // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2024»». — Лыткарино: научно-исследовательский институт приборов, 2024. — С. 35–36.
3. Tada H. Y.; Carter J. R. et al. Solar cell radiation handbook, 1977. 300 p.



УДК 60 ББК 32.853.1

Электронно-лучевая полировка пластин карбида кремния

Атаманчук А. А., Авдеев С. П.

Южный федеральный университет

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

aatamanchuk@sfedu.ru, savdeev@sfedu.ru

Предложен способ полировки пластин карбида кремния через сублимацию кремния из-за диссоциации карбида кремния во время электронно-лучевого воздействия. Способ может быть альтернативой популярному химико-механическому способу полировки пластин карбида кремния после резки его слитка на пластины.

Ключевые слова: SiC; диссоциация SiC; карбид кремния; полировка; электронно-лучевая обработка.

На этапе резки слитка карбида кремния на пластины режущим инструментом вносится множество дефектов в поверхностный слой изготавливаемых пластин. Они препятствуют проведению последующих операций, например литографии, легированию, эпитаксии и другим [1]. Улучшение качества пластин осуществляется шлифовкой и полировкой. Наиболее популярным методом является химико-механическая полировка (СМР) [2, 3]. Однако этот метод не лишен недостатков. Так, дефектный поверхностный слой пластины не удаляется полностью; из-за наличия механического воздействия на пластину могут возникнуть новые дефекты; метод имеет высокую стоимость, к тому же в случае SiC-пластин их полировка сталкивается с проблемами длительного времени обработки и низкой технической гибкости [1, 4].

Более перспективным немеханическим подходом в полировке SiC может стать термическая модификация поверхности сканирующим электронным лучом [5–17].

Обработка поверхности карбида кремния сканирующим электронным ленточным лучом вызывает ее нагрев. При достижении определенной температуры карбид кремния начинает диссоциировать, распадаясь на кремний и углерод. Кремний будет возгоняться (сублимироваться), а углерод будет графитизировать поверхность SiC. Этот классический процесс электронно-лучевой диссоциации SiC имеет достаточно простую модель, дающую оценку глубины сублимации Si из SiC [18]. Сублимация кремния приведет к уменьшению объема всех элементов рельефа поверхности пластины SiC. Можно было бы ожидать, что такая сублимация Si будет равномерной, неселективной и не даст заметного выглаживания поверхности.

Это предположение было проверено на модели поверхности, в которой рельеф поверхности строился из правильных четырехугольных пирамид. Моделирование показало, что верхние части пирамид нагреваются до больших температур, чем нижние, поэтому сублимация Si будет идти селективно: верхние части пирамид будут сокращаться быстрее, чем нижние, и это приведет к планаризации поверхности. В рамках этой модели была получена оценка изменения шероховатости ΔRa поверхности:

$$\Delta Ra = \frac{3wF(1 + M_c/M_{Si})}{2\rho_{л.} S_{\text{выст.}}^2},$$

где w — ширина электронного луча; F — скорость сублимации, выраженная в массовых единицах; M_C и M_{Si} — молярные массы углерода и кремния соответственно; ρ — плотность SiC; $v_{л.}$ — скорость прохода луча над обрабатываемой поверхностью; $S_{выст.}$ — средний шаг местных выступов профиля в соответствии с ГОСТ 2789-73.

К тому же термическое воздействие способно сократить плотность более глубоких дефектов в пластине, также улучшая ее качество.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- предложен альтернативный способ финишной обработки пластин карбида кремния;
- создана модель, отражающая поведение рельефа поверхности пластины SiC во время электронно-лучевой обработки;
- в рамках данной модели дана оценка изменения шероховатости поверхности в результате электронно-лучевой обработки.

Литература

1. Атаманчук А.А. Исследование и разработка технологического процесса электроннолучевой финишной обработки подложек карбида кремния для силовой электроники: Выпускная квалификационная работа. — Таганрог: Южный федеральный университет, 2023.
2. HORIBA. Chemical Mechanical Planarization (CMP) [Electronic resource]. URL: <https://www.horiba.com/int/semiconductor/process/chemical-mechanical-planarization-cmp/> (accessed: 09.07.2024).
3. Srivastava M. et al. Review on the various strategies adopted for the polishing of silicon wafer — A chemical perspective // *Materials Today: Proceedings*, 2022. Vol. 63. P. 62–68.
4. Zantye P. B., Kumar A., Sikder A. K. Chemical mechanical planarization for microelectronics applications // *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2004. Vol. 45. № 3–6. P. 89–220.
5. Gusev E. Y. et al. Investigation of Structure Formation Modes for Metasurfaces and Confocal Optical Systems // *Physics of the Solid State*, 2023. Vol. 65. № 12. P. 2081–2084.
6. Avdeev S., Mileshko L., Garanga S. Thermodynamic Analysis of the Reactions of Formation of Potassium, Zin. and Aluminum Phosphates during the Electron-Beam Processing of Blue-Green Glass SZS23 // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2019. Vol. 13. P. 456–457.
7. Gusev E. Yu., Avdeev S. P., Ageev O. A. Thermodynamic Analysis of Interface-Interaction Processes in a Silicon/Silicon Carbide Structure during Electron-Beam Treatment // *Surf J. Investig.*, 2019. Vol. 13. № 2. P. 256–260.
8. Пат. 2389109 С2 Российская Федерация, МПК7 Н 01 L 21/42, В 82 В 3/00. Способ подготовки поверхности пластин бинарных и многокомпонентных материалов / Авдеев С. П., Агеев О. А., Гусев Е. Ю., Чердниченко Д. И., Светличный А. М., Коноплев Б. Г., заявитель и патентообладатель — ФГОАУ ВПО «Южный федеральный университет» (ЮФУ). — № 2008113559/28, заявл. 07.04.08; опубл. 10.05.10, бюл. № 13. 8 с.: ил.



9. Авдеев С. П. и др. Повышение механической и химической устойчивости поверхности оптического стекла боролантановой группы // Прикладная физика, 2010. — № 3. — С. 140–142.
10. Авдеев С. П., Гаранжа С. Н. Влияние электронно-лучевой обработки на элементный состав цинковоалюмофосфатного стекла // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, 2012. — Т. 12. — № 2. — С. 26–27.
11. Авдеев С. П., Кравченко А. А., Гусев Е. Ю. Влияние электронно-лучевой обработки на параметры фотоэмитирующих структур и фактор шума МКП // Прикладная физика, 2007. — № 3. — С. 67–72.
12. Авдеев С. П. и др. Модификация параметров контактов металл-карбид кремния импульсной термообработкой // Физика и химия обработки материалов, 2004. — № 6. — С. 84–88.
13. Авдеев С. П. и др. Перспективы применения электронно-лучевой обработки для модификации золь-гельных пленок легированного диоксида кремния // Физика и химия обработки материалов, 1998. — № 2. — С. 77–83.
14. Авдеев С. П. и др. Вторично-эмиссионные характеристики свинцово-силикатного стекла после электронно-лучевой обработки в вакууме // Известия вузов. Электроника, 1997. — Т. 4. — № 3.
15. Авдеев С. П., Чередниченко Д. И. Электронно-лучевая обработка микроканальных пластин // Вакуумная техника и технология, 1996. — Т. 6. — № 3. — С. 23–26.
16. Авдеев С. П. и др. Вторичноэмиссионные свойства свинцовосиликатных стекол после электронного облучения // Физика и химия стекла, 1996. — Т. 22. — № 1. — С. 39.
17. Atamanchuk A. et al. Sublimation Mechanism for Polishing Silicon Carbide Wafers by Electron Beam // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № S1. P. S176–S178.
18. Дмитриев А. Н., Чередниченко Д. И. Формирование слоев графена сублимацией карбида кремния в вакууме сканирующим источником тепла // Известия вузов. Электроника, 2010. — Т. 86. — № 6. — С. 12–18.

УДК 621.396.96

Оптимизация формы сверхширокополосного зондирующего сигнала для максимизации нелинейного отклика от объекта зондирования по основанной на измерениях модели**Безрукова И. В., Семенов Э. В., д. т. н.***Институт сверхточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, Академический просп., 2/3*

При помощи основанной на измерениях модели была найдена оптимальная форма тестового сигнала для эффективного воздействия на нелинейный объект (малоразмерный ФМ-приемник) при определенной длительности импульса и напряженности поля 200 В/м. При использовании тестового сигнала в форме производной импульса Гаусса наблюдается максимальный нелинейный отклик от объекта при постоянной времени 0,2 нс.

Ключевые слова: нелинейная видеоимпульсная локация; сверхширокополосные сигналы; нелинейные отклики.

Видеоимпульсные сигналы увеличивают информативность систем локации за счет расширения полосы частот тестового сигнала. Учет нелинейной составляющей отклика зондируемых объектов еще более повышает информативность [1], делая нелинейную видеоимпульсную локацию перспективной для различных задач. Одной из проблем нелинейной видеоимпульсной локации является отсутствие информации о рассеивающих свойствах объектов. Рассеивающие свойства объектов важно знать для анализа и оптимизации процессов воздействия на нелинейные объекты. В последнее время основанная на измерениях модель объекта зондирования создана и рассматривается далее в докладе. С использованием этой модели можно выяснить, какие формы тестовых сигналов обеспечивают максимальный нелинейный отклик от объекта зондирования.

Основанная на измерениях модель была получена при тестировании нелинейного объекта (малоразмерный ФМ-приемник). Тестирование объекта выполнялось в ТЕМ-камере, что обеспечивает воздействие на объект ступенчатыми электромагнитными импульсами, спектр которых начинается от постоянного тока [2].

В качестве формы тестового сигнала был взят моноцикл Гаусса, описываемый первой производной импульса Гаусса:

$$e(t) = -t \cdot \exp\left[-(t/\tau)^2\right], \quad (1)$$

где τ — постоянная времени.

Моноцикл Гаусса — сверхширокополосный сигнал с центральной частотой и шириной полосы, полностью определяемой постоянной времени. Известно, что в обычной гармонической нелинейной локации оптимальная частота зондирования объектов составляет около 1 ГГц [3]. Мы выбрали диапазон для постоянной времени от 0,1 до 1 нс, что обеспечивает максимум спектра моноцикла также в окрестности 1 ГГц.

Для моноцикла Гаусса $e(t)$ нелинейные отклики от объекта зондирования по основанной на измерениях модели получены по формуле

$$\varepsilon_m(t) = A[e(t)] F^{-1}\{H_n(\omega)F[e(t)]\}, \quad (2)$$

где $A[e(t)]$ — функционал, учитывающий степень отличия текущего тестового воздействия от того, которое применялось при вычислении передаточной функции объекта $H_n(\omega)$; F и F^{-1} — прямое и обратное преобразования Фурье.

Значение функционала определяется по формуле

$$A[e(t)] = A[\max(F^{-1}\{H_n(\omega)F[e(t)]\})], \quad (3)$$

где $H_n(\omega) = 1/(1 + j\omega t)$ — передаточная функция фильтра нижних частот.

На рис. 1а представлены в целом нелинейные отклики объекта на тестовый сигнал при изменении постоянной времени от 0,1 до 1 нс, а на рис. 1б — их амплитуда.

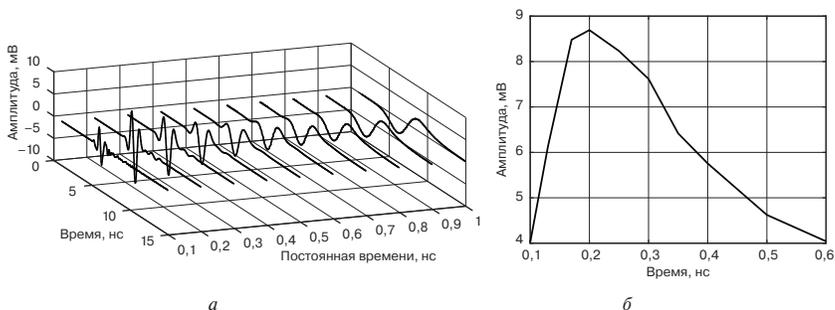


Рис. 1. Нелинейные отклики объекта: а) в целом как функция времени и постоянной времени τ ; б) амплитуда нелинейных откликов объекта как функция постоянной времени тестового сигнала

Из рис. 1б можно видеть, что максимальный нелинейный отклик наблюдается при постоянной времени τ , равной 0,2 нс. Максимальному нелинейному отклику соответствует максимум спектра тестового сигнала на частоте 1,1 ГГц.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2024-0001).

Литература

1. Авдеев В. Б., Панычев С. Н. Сверхкороткоимпульсная сверхширокополосная нелинейная радиолокация // Телекоммуникации, 2006. — № 8. — С. 23–27.
2. Семенов Э. В., Назаров М. А., Фатеев А. В., Полторыхин К. М., Березин А. А., Поздняков В. С. Измерение нелинейного рассеяния видеоимпульсных электромагнитных волн малоразмерными объектами // Приборы и техника эксперимента, 2024 [в печати].
3. Щербаков Г. Н. Применение нелинейной радиолокации для дистанционного обнаружения малоразмерных объектов // Специальная техника, 1999. — № 1. — С. 34–39.



УДК 621.3.049

Разработка компактных SPICE-моделей МОП-транзисторов с учетом разброса температурно-зависимых параметров

Хлынов П. А., Самбурский Л. М.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

(Московский институт электроники и математики)

123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34

pakhlynov@edu.hse.ru, lsambursky@hse.ru

Учет разброса параметров SPICE-моделей полупроводниковых компонентов необходим для получения более достоверных результатов схемотехнического моделирования в процессе проектирования электронной аппаратуры, особенно предназначенных для работы в условиях, отличных от нормальных, или в тех, к которым предъявляются строгие требования. В данной работе производится сравнение и анализ двух подходов для получения значений разброса температурно-зависимых параметров SPICE-моделей транзисторов, а также представлена модель для реализации зависимости разброса электрических характеристик транзистора от температуры.

Ключевые слова: SPICE-модель; МОП-транзистор; температурно-зависимые параметры; разброс параметров модели; метод Монте-Карло.

При разработке специализированной электроники, как правило, требуется учитывать влияние внешней и внутренней температуры в широком диапазоне для предотвращения отказов во время работы устройства [1], причем достаточно достоверные результаты моделирования могут быть получены только с учетом вариативности параметров и характеристик отдельных электронных компонентов.

Проблема учета разброса усугубляется с расширением диапазона температуры (см. рис. 1). Разброс отдельных компонентов может быть учтен при схемотехническом моделировании различными способами: с помощью метода Монте-Карло, угловых моделей и др. [2].

В данной работе рассматриваются несколько подходов для определения значений разброса параметров SPICE-моделей на основе результатов натуральных измерений или анализа технических условий.

В соответствии с первым подходом определяют усредненные параметры SPICE-модели транзистора на основе усредненных характеристик, после чего подбирают коэффициенты разброса параметров модели на основе имеющегося разброса характеристик транзисторов. В соответствии со вторым подходом определяют параметры SPICE-модели для каждого имеющегося экземпляра транзистора, после чего применяют статистические методы для расчета коэффициентов распределения параметров модели (среднее и отклонение). В соответствии с третьим подходом для определения разброса параметров SPICE-моделей используют ограниченные данные из ТУ.

Для сокращения времени разработки моделей рассчитывают разброс только выбранных статистически независимых параметров [3].

Сравнение подходов для определения значений разброса параметров SPICE-моделей производится по различным важным для практики проектирования



параметрам: затраченное время, сложность и трудоемкость процедуры, степень достоверности результатов. Верификация производится на практических примерах.

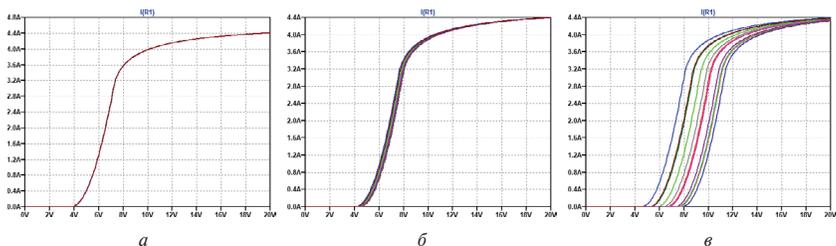


Рис. 1. Результаты моделирования при температуре 0°C (а), 20°C (б), 120°C (в)

Литература

1. Елисеева Д. А., Сафонов С. О. Анализ механизмов деградации подзатворных диэлектриков на основе SiO₂ в МОП-транзисторах // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2020. — Т. 25. — № 6. — С. 517–524.
2. Денисенко В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии, 2004. — № 36. — С. 28–34.
3. Lange A. et al. A general approach for multivariate statistical MOSFET compact modeling preserving correlations // 2011 Proceedings of the European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC). IEEE, 2011. P. 163–166.

УДК 53.06

Моделирование селектора ReRAM на основе туннельного диода

Курьянов А. О.^{1,2}, Теплов Г. С.^{1,2}, к. ф.-м. н.

¹ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
akuryanov@niime.ru*

² *АО «НИИМЭ»*

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

В работе было произведено моделирование селектора ReRAM на основе туннельного диода с использованием TiN в качестве электрода и различных материалов диэлектрика (Ta_2O_5 , TiO_2 , Si_3N_4). По результатам были выявлены геометрические размеры структуры, подходящие для соответствия требуемым параметрам элементов хранения.

Ключевые слова: ReRAM; моделирование; селектор.

В настоящее время микроэлектроника сталкивается с рядом проблем, характерных для устройств памяти, основанной на технологии Flash [1]. В целях решения этой проблемы разрабатываются новые технологии памяти, одним из которых является ReRAM. Резистивная память с произвольным доступом (ReRAM) — это вид энергонезависимой памяти, которая работает за счет изменения сопротивления тонкого диэлектрического слоя под действием внешнего электрического поля. Элементы хранения ReRAM (мемристоры, англ. memristors) обладают высокой масштабируемостью, надежностью, низким энергопотреблением и высокой скоростью работы.

Традиционный подход к описанию мемристора позволяет определить его как элемент энергонезависимой памяти, имеющий два контакта [2]. Реализация функции памяти на элементе осуществляется за счет изменения состояния проводимости между высокорезистивным (HRS), которое соответствует логическому значению «0», и низкорезистивным состоянием (LRS), соответствующим логическому значению «1». На текущий момент выделяется два типа памяти ReRAM: CBRAM, в которой происходит формирование проводящего «мостика» между электродами из материала электродов, и OxRAM, основанная на управлении кислородными вакансиями в оксиде переходного металла.

Данная работа посвящена рассмотрению селекторного устройства — компонента массивов Crossbar ReRAM, который применяется совместно с мемристором. Селекторное устройство предназначено для контролирования тока утечки. Среди типов селекторов выделяют PN-диод, MIM-структуру, селекторы порогового переключения, а также селектор со сверхлинейным пороговым слоем и селектор со смешанной ионно-электронной проводимостью. Основными параметрами селекторных устройств являются токи записи и чтения, их соотношение, пороговое напряжение, время переключения, рабочая температура. В описывающей работу селектора модели устройства на основе диоксида ванадия [3] используются механизмы, связанные с эффектами джоулева нагрева и Пула — Френкеля.

В работе произведено рассмотрение большого количества различных материалов, которые имеют широкое применение в российской микроэлектронике,



для создания селектора на основе туннельного МИМ-диода. При выборе электрода было отдано предпочтение нитриду титана TiN, поскольку он обладает более подходящей величиной работы выхода в сравнении с нитридом тантала TaN. В качестве диэлектрика были рассмотрены оксид титана TiO₂, нитрид кремния SiN_x и оксид тантала Ta₂O₅. В результате моделирования были выявлены оптимальные размеры селекторных устройств для двух материалов. Селектор на основе структуры TiN-Ta₂O₅-TiN при площади электрода в 2,5 мкм² и толщине диэлектрического слоя d = 1,5 нм имел величину тока записи I_{он} 6 мА при напряжении 1,3 В и тока чтения I_{офф} 54 мкА при напряжении 0,1 В. Селектор на основе структуры TiN-TiO₂-TiN при площади электрода в 0,4 мкм² и толщине диэлектрического слоя d = 1,5 нм имел величину тока записи I_{он} 4 мА при напряжении 1,3 В и тока чтения I_{офф} 79 мкА при напряжении 0,1 В.

Литература

1. Meena J. S. et al. Overview of emerging nonvolatile memory technologies // Nanoscale research letters, 2014. Vol. 9. P. 1–33.
2. Теплов Г. С., Горнев Е. С. Модель на языке Verilog-A многоуровневого биполярного мемристора с учетом девиаций параметров переключения // Микроэлектроника, 2019. — Т. 48. — № 3. — С. 163–175.
3. Farjadian M., Shalchian M. Hybrid electrothermal model for insulator-to-metal transition in VO₂ thin films // IEEE Transactions on Electron Devices, 2020. Vol. 68. № 2. P. 1–5.

УДК 621.382.323

Электротепловое моделирование мощных схем с использованием ПО Python Spice

Зубкова А. И., Харитонов И. А.*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
Alex2000zu@yandex.ru*

Возможности ПО Python использованы для управления процессом электротеплового расчета силовых схем и ускоренного получения тепловых и динамических тепловых характеристик схем с большими постоянными времени вследствие использования радиаторов, имеющих большие теплоемкости. Приведены результаты электро--тепловых расчетов и измерений для ряда силовых схем.

Ключевые слова: МОП-транзистор; силовые схемы; радиаторы; цифровой двойник; Python Spice; электротепловая модель.

Введение

Силовые схемы на мощных МОП-транзисторах широко распространены в различных устройствах управления механизмами [1], в преобразовательной аппаратуре и т.д. За счет рассеиваемой мощности в схеме может происходить сильный нагрев кристаллов транзисторов, приводящий к ускорению процессов деградации их структур. Поскольку при этом мощные МОП-транзисторы работают с большими мощностями, то для их охлаждения они устанавливаются на радиаторах, имеющих значительную теплоемкость.

Для оптимизации электротепловых режимов работы мощных транзисторов в целях обеспечения безопасной области их работы используются методы схемотехнического, теплового и совместного электротеплового анализа конструкций мощных блоков.

Для повышения эффективности электротепловых расчетов силовых схем целесообразно использовать среду Python вместе со встроенным SPICE-симулятором схем.

Моделирование мостовой схемы для управления двигателем с мощными МОП-транзисторами

При моделировании мощных схем управления среда ПО Python использовалась для реализации и использования в расчетах ЦД мощных МОП-транзисторов [2] и управления процессом SPICE-расчета схем.

Приведен пример электротеплового моделирования мощной схемы управления двигателем (рис. 1) с использованием нескольких вариантов МОП-транзисторов и радиаторов охлаждения.

Импульсный сигнал, подаваемый на затворы транзисторов, переключает их с постоянной частотой, определяющей частоту и направление ротора.

Электротепловое моделирование было проведено для нескольких транзисторов и радиаторов в средах Python Spice и LtSpice (для контроля результатов). Пример

результатов моделирования с использованием транзистора IRF530 и радиатора изображен на рис. 2 слева, затраты времени процессора — $t = 3220$ сек.

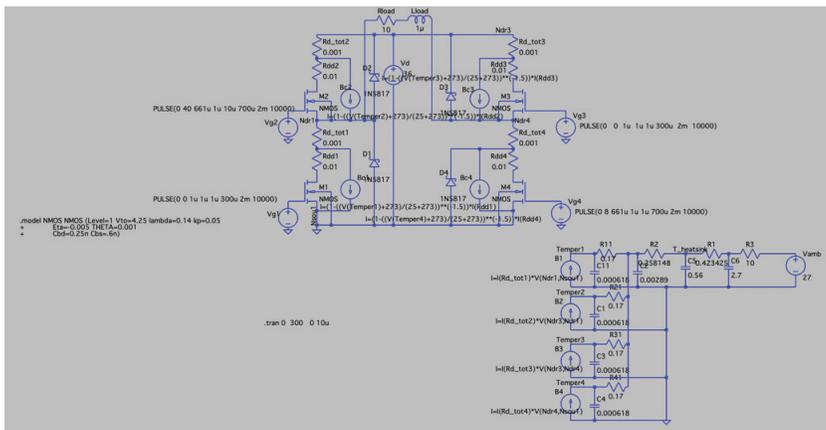


Рис. 1. Мостовая схема для управления двигателем с транзистором IRF610 при $R_{load} = 10$ Ом и радиатором с тепловыми параметрами: Cheatsink = 2,7 F, Rheatsink-amb = 10 C/Вт, ПО Lt Spice

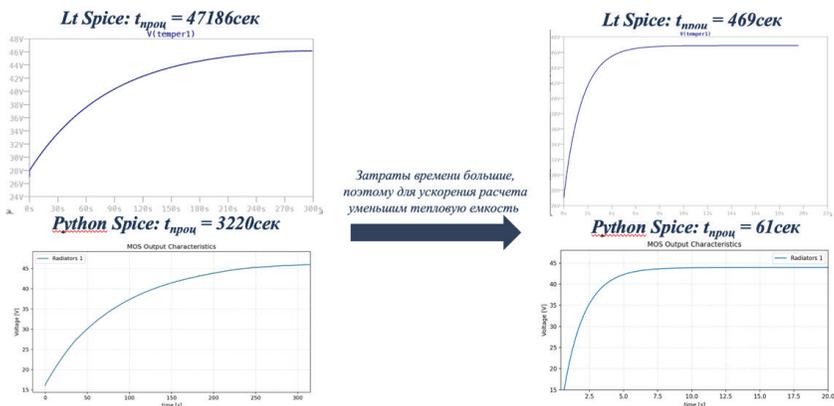


Рис. 2. Смоделированные изменения во времени значений температуры мощных МОП-транзисторов IRF530 мостовой схемы для управления двигателем при $R_{load} = 10$ Ом и радиатором с тепловыми параметрами: Rheatsink-amb = 10 C/Вт, Cheatsink = 2,7 F (слева) и Cheatsink = 0,027 F (справа)

Из-за больших тепловых емкостей радиаторов, отображаемых на тепловой схеме емкостью Cheatsink = 2,7 F, расчет длится от нескольких минут (при маленьких тепловых емкостях) до нескольких дней. Это связано с тем, что при больших

Ст радиаторы охлаждения выходят на постоянный тепловой процесс за время порядка минут, частота работы схемы высокая и SPICE-расчет идет с малыми шагами по времени.

Для ускорения электротепловых расчетов силовых схем с радиаторами при помощи ПО Python реализован алгоритм, позволяющий:

- быстрее получить значения температур мощных компонентов при выходе схемы на стационарный тепловой режим за счет уменьшения тепловых емкостей радиаторов;
- оценить время выхода схемы на стационарный тепловой режим за счет оценки постоянных времени тепловых схем.

На рис. 2 справа приведены смоделированные изменения температуры мощных МОП-транзисторов IRF530 при уменьшенных значения тепловых емкостей радиаторов. Результаты получены за $t = 61$ сек. времени процессора.

Заключение

В работе был отработан алгоритм ускорения процесса моделирования электротепловых характеристик схем управления с несколькими мощными МОП-транзисторами. В дальнейшем планируется усовершенствование данной программы с помощью добавления новых схем, моделей и возможностей.

Литература

1. Andrei Velcescu. Using power MOSFETs in DC motor control applications. URL: https://www.nexperia.com/applications/interactive-app-notes/IAN50004_using-power-MOSFETs-in-DC-motor-control-applications (дата обращения: 01.05.2024).
2. Зубкова А. И. Харитонов И. А. Разработка цифровых двойников для мощных МОП-транзисторов // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов имени Е. В. Арменского. — 2023.
3. Петросянц К. О., Харитонов И. А. Улучшенная процедура электротеплового моделирования силовых ДМОП каскадов ИС // Труды Всероссийской НТК «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем (МЭС) — 2020». — 2020.



УДК 62-713.3

Модернизация системы охлаждения фокальной плоскости оптико-электронного преобразователя

Трофимов Д. А., Лавренов В. А.

АО «Российские космические системы», НПЦ «ОПТЭКС»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Гуськова, 8, стр. 2

Приведено описание фокальной плоскости разрабатываемой системы и ее системы охлаждения. Проанализированы различные способы осуществления модернизации. Выполнена модернизация теплообменника в составе системы охлаждения. Проведены тепловые расчеты.

Ключевые слова: телескоп; фокальная плоскость; фотоприемник; система охлаждения; теплообменник.

Для обеспечения высокого разрешения съемки и покрытия большого объема неба современные телескопы имеют широкий диаметр объектива, в связи с этим в фокальных плоскостях устанавливают массив из определенного количества фотоприемников в виде мозаики. Также для астросъемки характерны большие выдержки для накопления слабого сигнала небесных тел, это, в свою очередь, предъявляет повышенные требования по чувствительности к массиву фотоприемников. Для увеличения чувствительности необходимо уменьшить значение темного сигнала фотоприемника, сильно зависящее от температуры [1, 2]. Наилучшим способом снижения температуры является использование системы охлаждения.

Основными источниками тепла в фокальной плоскости разрабатываемой системы являются фотоприемники. Суммарный объем тепловыделения в системе составляет 85,5 Вт. Система охлаждения должна обеспечивать функционирование фотоприемников в температурном диапазоне 173 ± 5 К. Для этого используется система охлаждения с газообразным азотом в виде хладагента, циркулирующего через теплообменник.

Исходный теплообменник имел сложную технологию изготовления и большое количество паяных соединений. Из-за больших перепадов температур теплообменник мог оказаться ненадежным и выйти из строя, что и стало причиной осуществления модернизации.

Проанализированы различные способы осуществления модернизации в целях повышения надежности и технологичности, после чего принято решение остановиться на методе изготовления теплообменника с помощью 3D-печати, а конкретно селективного лазерного плавления. В связи с этим был выбран новый материал теплообменника и внесены необходимые конструктивные изменения

Выполненные тепловые расчеты доказали работоспособность модернизированного теплообменника. Далее теплообменник был изготовлен по выбранной технологии.

Литература

1. Бакланов А. И. Системы наблюдения и мониторинга: Учебное пособие. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 234 с.
2. Квитка В. Е., Лавренов В. А., Мастюгин С. М., Блинов В. Д., Шепелев А. С., Петров В. В. Анализ возможности создания охлаждаемых мозаичных фокальных плоскостей на отечественных комплектующих // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. — Сочи, 2022. — С. 95–103.

УДК 621.3.049

Перераспределение примеси на границе поликремний — кремний при моделировании диффузии из поликремния в TCAD при различных моделях диффузии

Федотов А. В., Самбурский Л. М.*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
avfed05@mail.ru*

Параметры границы раздела поликремний — кремний при моделировании термических процессов существенно зависят от выбора модели диффузии из имеющихся в TCAD. В данной работе на основе экспериментальных данных проведено сравнение имеющихся в TCAD моделей диффузии в применении к этим материалам и даны рекомендации к выбору модели.

Ключевые слова: Sentaurus TCAD; поликремний; моделирование; диффузия; коэффициент сегрегации.

Термическая диффузия примеси из высоколегированного поликремния в монокристаллический кремний — один из распространенных способов формирования рп-переходов и легированных областей в подложке. При моделировании данного процесса важно задать правильные механизмы процесса диффузии примеси из поликремния в кремний. В TCAD имеется большое количество математических моделей процесса диффузии примеси, которые между собой значительно отличаются в характеристиках границы раздела поликремний — кремний [1]. В частности, коэффициент перераспределения примеси на границе (коэффициент сегрегации) может отличаться на несколько порядков, отличается доза примеси, внедренная в кремний, глубина залегания формируемого рп-перехода и др.

В данной работе продемонстрированы различия между математическими моделями диффузии примеси из поликремния в кремний, существующими в TCAD, на границе раздела материалов, а также показано, какие модели демонстрируют наибольшее соответствие с экспериментальными данными процесса диффузии примеси.

На основании ВИМС-измерений профилей распределения примеси в тестовых структурах проведена работа по калибровке результатов моделирования с результатами эксперимента путем внедрения калибровочных коэффициентов в математическую модель диффузии (для заряженных и незаряженных пар междоузлия — примесный атом). Продемонстрирована воспроизводимость соответствия профилей распределения, получаемых в результате моделирования диффузии с помощью откалиброванной модели, с экспериментальными данными. Описаны рекомендации по использованию откалиброванной модели.

Литература

1. Sentaurus Process User Guide. Version H-2013.03, March 2013.



УДК 544.18

Моделирование поведения частицы в наноструктурах методом конечных разностей во временной области в программной среде Matlab

Форофонов И. А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

Исследован метод FDTD, определено отличие данного метода от метода FEM и разработана программа по моделированию поведения частицы при движении в сторону одномерных (или двумерных) односторонних потенциальных барьерных структур в программной среде Matlab для нанoeлектронной области применения.

Ключевые слова: метод конечных разностей (FDTD); метод конечных элементов (FEM); Matlab; частица; волна.

Finite-difference time-domain (FDTD) [1], возможно, самый простой, как концептуально, так и с точки зрения реализации, из полноволновых методов, используемых для решения проблем при моделировании электромагнитного излучения.

Finite element method (FEM) [3] — это общий численный метод решения дифференциальных уравнений в частных производных с двумя или тремя пространственными переменными. Чтобы решить задачу, FEM подразделяет большую систему на более мелкие и простые части, как раз и называемые конечными элементами. В методе конечных разностей аппроксимируются производные искомых функций, а в методе конечных элементов — само решение (т. е. зависимость искомых функций от пространственных координат и времени). В основе аппроксимации лежит идея упрощения сложных данных с целью получить более компактное представление. Аппроксимация может быть полезна, когда у вас есть много сложных функций и вы хотите найти более удобное представление для анализа.

Приведенные вычисления, использованные в работе, показывают, что FEM и FDTD даже при рассмотрении аппроксимации значительно отличаются друг от друга в пользу последнего с точки зрения удобства и точности.

Основываясь на технике воспроизводства алгоритма FDTD, предложенного Кейном Йи в 1966 году [4], рассмотрим более сложную систему моделирования поведения частицы (волны) в потенциальных барьерах: одностороннем и двустороннем.

1. Анализ поведения частицы в одном направлении, ограниченном барьером (рис. 1):

а) задаем количество шагов (steps), которое необходимо для задания времени (50 steps = 1 фс);

б) барьер начинается с 20 нм (т. е. 200 Å). Вероятность расположения частицы не зависит от того, в каком месте расположен барьерный профиль. Вероятность зависит от направления движения частицы (волны), в этом случае идет слева направо. Дополнительно в программном коде были вычислены коэффициенты отражения и прохождения частицы через барьер;

в) идет построение как гауссовым распределением, так и синусоидальной функцией для показа универсальности кода метода FDTD в программной среде Matlab [5];

г) у синусоидальной функции временная составляющая неизменна в нулевой момент времени. Поэтому мнимая часть равна 0 (уходит пунктирная линия).

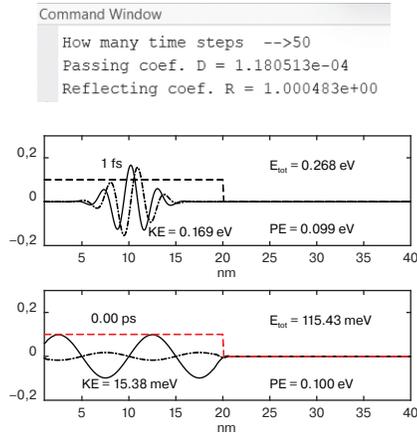


Рис. 1. Моделирование поведения частицы в одномерном одностороннем потенциальном барьере

2. Аналогично предыдущему примеру можно изменить барьер, сделав двусторонний, как у транзисторов (рис. 2).

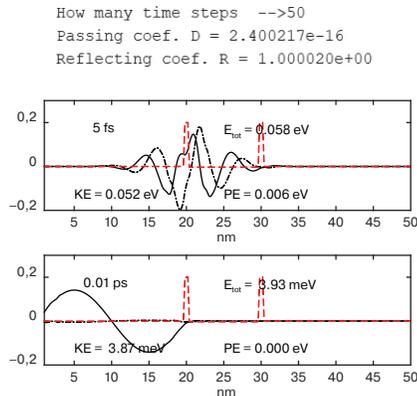


Рис. 2. Моделирование поведения частицы в одномерном двустороннем потенциальном барьере



Был написан код в Matlab для моделирования распространения частицы (электрона) с использованием метода FDTD при движении в сторону области потенциальных барьеров [6]. FDTD в Matlab — эффективный инструмент для моделирования частиц в наноструктурах. Сравнение с FEM показало преимущество FDTD в решении задач с частицами и барьерами. Метод FDTD позволяет более точно описать поведение частиц в различных системах, включая потенциальные барьеры. Полученные решения важны для понимания процессов в нанохимии, микро- и наноэлектронике и могут способствовать разработке новых технологий и устройств.

Литература

1. Schneider J. B. Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method. Washington State University, 2023.
2. Скубачевский А. А., Хохлов Н. И. Численное решение уравнений Максвелла для моделирования распространения электромагнитных волн // Труды МФТИ, 2016. — Т. 8. — № 3. — С. 121–130.
3. Taflov A., Hagness S. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method // London: Artech House, 2005. P. 51–80.
4. Kane Y. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966. Vol. 14 (3). P. 302–307.
5. Harris F. E. Mathematics for Physical Science and Engineering. Symbolic Computing Applications in Maple and Mathematica // Amsterdam Elsevier, 2014.
6. Attaway D. C. MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving // Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018.



УДК 621.396.67

Моделирование структур на криволинейных поверхностях

Чечеткин В. А., д. т. н., Шабунин С. Н.

*УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
v.a.chechetkin@urfu.ru*

Исследуются вопросы моделирования СВЧ-антенн на криволинейных поверхностях. Рассматривается влияние кривизны поверхности на характеристики излучения и проводится сравнение со структурами, расположенными на плоскости.

Ключевые слова: патч-антенна; криволинейная поверхность; диаграмма направленности.

Конформные антенны, повторяющие поверхность различных устройств, широко применяются в мобильной технике, носимой электронике, а также в транспортных системах, позволяя не нарушать аэродинамические свойства конструкций и не выходить за требуемые габаритные размеры. При этом круговые и дуговые антенные решетки позволяют обеспечить сканирование по всем азимутальным направлениям [1].

Численный анализ конструкций, состоящих из нескольких слоев диэлектрика, зачастую требует большого машинного времени и требователен к вычислительным ресурсам, особенно при проектировании устройств миллиметрового диапазона длин волн.

Применение аналитических методов анализа, основанных на аппарате тензорных функций Грина для слоистых структур, позволяет получить компактные выражения для нахождения поля излучения антенн, расположенных на плоских и криволинейных поверхностях [2]. Решение, полученное для структуры диэлектрических слоев, может быть использовано для быстрого пересчета поля отдельных антенн и антенных решеток в зависимости от их конфигурации. Анализ производится сразу во всем частотном диапазоне, поскольку все геометрические параметры выражаются в длинах волн.

Получены диаграммы направленности для патч-антенн, расположенных на проводящем цилиндре, покрытом диэлектриком, а также в присутствии диэлектрического антенного укрытия. Показано, что в зависимости от ориентации патч-антенны на цилиндре будет меняться форма диаграммы направленности.

Литература

1. Клыгач Д. С., Вахитов М. Г., Хашимов А. Б., Клыгач Д. С. Особенности динамических диаграмм направленности цилиндрических фазированных антенных решеток // Журнал радиоэлектроники, 2020. — № 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.3.12.
2. Chechetkin V., Knyazev S., Panchenko B., Shabunin S. Green's functions of layered structures in Cartesian, Spherical and Cylindrical Coordinates // Proceedings of the 13th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2019. Krakow, 2019.



УДК 621.371

К расчету электродинамических параметров несимметричной микрополосковой линии

Ярылков А. Д., Сазонов Е. С.

*МИРЭА — Российский технологический университет**119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78**yarlykov@mirea.ru, neo.sazonov2017@yandex.ru*

Разработаны сверхбыстродействующие модели (СБМ) полосковых линий различного типа, позволяющие в широком диапазоне изменения их геометрических параметров, диэлектрической проницаемости подложки и частоты производить расчет коэффициента замедления и волнового сопротивления с высокой точностью при небольшом времени счета.

Ключевые слова: полосковые линии; электродинамические параметры; СВЧ-модули.

Современные подходы к разработке радиотехнических устройств на полосковых линиях сводятся к определению матрицы рассеяния с использованием метода декомпозиции, позволяющего производить ее расчет при помощи вспомогательных матриц передачи простейших (базовых) полосковых элементов, на которые расчленяется устройство. Для определения матриц рассеяния и передачи базовых элементов, а также при расчете топологии всего устройства СВЧ в целом необходимо предварительно производить расчет основных электродинамических параметров полосковых линий передачи, к которым следует отнести коэффициент замедления и волновое сопротивление. Однако при этом обнаруживается **актуальная научная проблема**, заключающаяся в том, что используемые в коммерческих программах приближенные (эвристические) методы для расчета основных электродинамических параметров полосковых линий значительно снижают точность полученных результатов, а строгие электродинамические методы требуют значительных временных затрат и высокой квалификации инженера-разработчика. Поэтому актуальной задачей является разработка сверхбыстродействующих моделей (СБМ) полосковых линий различного типа, позволяющих в широком диапазоне изменения их геометрических параметров, диэлектрической проницаемости подложки и частоты производить расчет коэффициента замедления и волнового сопротивления с высокой точностью при небольшом времени счета.

В начале статьи рассматривается **математическая модель экранированной микрополосковой линии с использованием проекционного подхода**.

Решение задачи о собственных волнах экранированной микрополосковой линии решается в два этапа. На первом этапе решается задача возбуждения волновода с двухслойным диэлектриком поверхностным током на полосковом проводнике. В результате напряженности электрического и магнитного поля внутри идеально проводящего экрана можно представить как векторные функции в виде бесконечных рядов Фурье, которые:

- 1) удовлетворяют однородной системе уравнений электродинамики для комплексных амплитуд напряженностей поля;
- 2) удовлетворяют граничным условиям электродинамики на идеально проводящих стенках экрана;

- 3) обеспечивают непрерывность тангенциальной составляющей напряженности электрического поля на границе областей I и II;
- 4) удовлетворяют граничному условию для тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на границе областей I и II.

При этом полученные векторные функции дают решение задачи о собственных волнах через поверхностную плотность тока на полосковом проводнике:

$$\vec{\eta}(x, z) = \vec{\eta}(x)e^{-\Gamma z},$$

где Γ — постоянная распространения.

Из условия существования нетривиального решения однородной СЛАУ (равенства нулю ее определителя) в первом приближении получено дисперсионное уравнение, из которого определяется коэффициент замедления n_0 МПЛ:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\chi_m^2} (n_0^2 G_m^{\exists} + \alpha_m^2 G_m^M) \right] J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta) = 0.$$

Используя выражения для собственных волн, можно получить следующее выражение для волнового сопротивления МПЛ:

$$Z_0 = \frac{240\pi}{k_0 a} n_0 \sum_{m=1}^{\infty} \left[-\left(n_0^2 (G_m^{\exists})' + \alpha_m^2 (G_m^M)' \right) + \frac{\alpha_m^2}{\chi_m^2} (G_m^M - G_m^{\exists}) \right] \cdot \frac{1}{\chi_m^2} J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta),$$

где $(G_m^{\exists, M})'$ — производная функции $G_m^{\exists, M}$ по n_0^2 .

В результате анализа численных результатов установлено, что размеры экрана практически не влияют на точность расчета электродинамических параметров. При $a/h \geq 200$, $b \geq a/2$ результаты расчета n_0 и Z_0 совпадают с точностью до 4–5 значащих цифр с результатами расчета для открытой линии.

Вторая часть статьи посвящена математической модели микрополосковой линии с узким полосковым проводником в квазистатическом приближении.

В [1] получено следующее выражение для волнового сопротивления Z экранированной микрополосковой линии с узким полосковым проводником в квазистатическом приближении:

$$Z = \frac{240}{n} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \frac{\sin^2(m\beta)}{\operatorname{cth}\left(m\pi \frac{h}{a}\right) + \operatorname{cth}\left(m\pi \frac{b-h}{a}\right)} J_0^2(m\alpha),$$

где n — коэффициент замедления, $\alpha = \frac{\pi W}{2a}$, $\beta = \alpha \left(1 + \frac{S}{W}\right)$.

Были выявлены зависимости между электродинамическими параметрами и характеристиками полосковой линии. Исходя из этих зависимостей, можно определить параметры полосковой линии, необходимой нам для разработки архитектуры будущего устройства, и определить погрешность в работе данного устройства. Данный анализ достаточно точен и не требует долгих и сложных расчетов. Помимо ускорения расчетов электродинамических параметров, удалось получить низкое влияние погрешности с уменьшением габаритов микрополосковой линии.

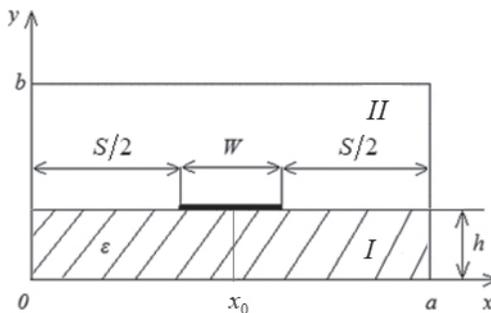


Рис. 1. Поперечное сечение экранированной микрополосковой линии

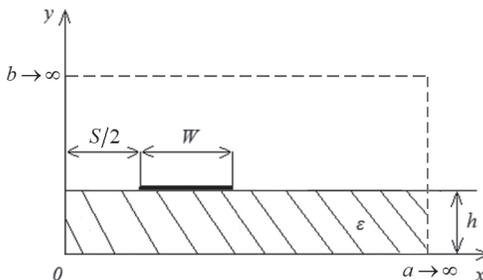


Рис. 2. Поперечное сечение линии

Литература

1. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. Аналитические выражения для электродинамических параметров экранированной микрополосковой линии // Российский технологический журнал, 2021. — Т. 9. — № 4 (42). — С. 68–76.
2. Костин М. С., Ярлыков А. Д. Электродинамика, радиоволновые процессы и технологии: Учебное пособие. — Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. — С. 123–131.
3. Костин М. С., Ярлыков А. Д. Устройства и модули сверхвысоких частот: Учебник. — Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. — С. 124–142.
4. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. Повышение эффективности проекционных моделей полосковых линий // Радиотехника и электроника, 2021. — Т. 66. — № 9. — С. 837–844.
5. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. Математическое моделирование открытой микрополосковой линии // Радиотехника и электроника, 2022. — Т. 67. — № 11. — С. 1096–1102.
6. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. К расчету дисперсионных характеристик экранированной микрополосковой линии // Радиотехника и электроника, 2024. — Т. 69. — № 4 (в печати).

7. Коваленко А. Н., Оводенко Г. Б., Ярлыков А. Д. Математическая модель экранированной микрополосковой линии // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*, 2018. — Т. 18. — № 3. — С. 552–556.
8. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. Численный анализ связанных микрополосковых линий // *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинфоком-2019»*. Сборник научных статей IV Международной научно-практической конференции. — М., 2019. — С. 230–235.
9. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. Численный анализ экранированной микрополосковой линии // *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинфоком-2021»*. Сборник научных статей V Международной научно-практической конференции. — Москва, 2021. — С. 331–334.
10. Шипорин В. М., Ярлыков А. Д. Границы применимости аналитических выражений для электродинамических параметров микрополосковой линии в квазистатическом приближении // *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2023»)*. Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции. — Москва, 2023. — С. 304–308.

УДК 621.318.43

Масштабируемая модель круглой спиральной катушки индуктивности для проектирования МИС СВЧ по технологии GaAs

Луняков А. Е., Дудинов К. В., Ефимов А. С.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

termitko62@mail.ru

В данной работе рассмотрены результаты построения масштабируемой модели круглой спиральной катушки индуктивности по технологии GaAs, интегрированной в библиотеку пассивных и активных элементов, необходимой для проектирования МИС СВЧ. Результаты сравнения расчета СВЧ-характеристик моделей с измерениями тестовых образцов показали максимальное расхождение параметров ЭС менее 9% в диапазоне частот до 50 ГГц включительно.

Ключевые слова: катушка индуктивности; арсенид галлия; библиотека элементов; монолитная интегральная схема; СВЧ; электромагнитное моделирование; параметрическая модель.

Проектирование твердотельных монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ требует наличия пользовательских библиотек пассивных и активных элементов. Элементы таких библиотек должны иметь достаточно точную математическую модель и содержать топологию с возможностью изменения геометрических параметров.

В данной работе представлены этапы построения масштабируемой модели круглой спиральной катушки индуктивности для GaAs-технологии, реализованной в АО «НПП» «Исток» им. Шокина». Масштабируемая модель включает схемотехническое и топологическое решения. Схемотехническое решение представлено эквивалентной схемой (ЭС), а топологическое — в виде макроса для автоматического построения топологии.

Катушка представляет собой круглую спираль из системы металлов Ti-Pt-Au-Ti (MET1 — верхняя металлизация). Для присоединения к внутреннему витку спирали изготавливается контактная линия (MET2 — нижняя металлизация). Изоляция между MET1 и MET2 обеспечивается слоем системы диэлектриков, а контакт обеспечивается посредством травления окна в диэлектриках.

В данной работе применена П-образная ЭС модели монолитной катушки индуктивности, представленная на рис. 1 [1].

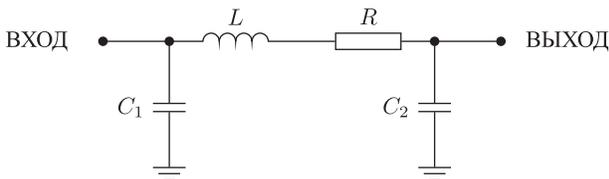


Рис. 1. ЭС спиральной катушки индуктивности

Эквивалентная схема включает следующие элементы: L — индуктивность (основной параметр), R — сопротивление (потери в проводнике), C_1 — емкость (между MET1 и подложкой), C_2 — емкость (между MET2 и подложкой).

Основные параметры для топологического проектирования:

- L — индуктивность (0,5–25 нГн);
- Rad — внутренний радиус (15–25 мкм);
- W — ширина линии (5–25 мкм);
- G — расстояние между витками (5–25 мкм).

Также был произведен анализ возможных выражений для связи геометрических (топологических) параметров с электрическими характеристиками спиральной катушки индуктивности, показывающих наибольшую сходимость с результатами ЭМ-расчета [2, 3].

Для верификации параметрической модели спиральной катушки индуктивности были изготовлены тестовые модули с различными геометрическими параметрами. На рис. 2 представлены зависимости мнимых частей входного импеданса от частоты тестовых модулей катушек индуктивности.

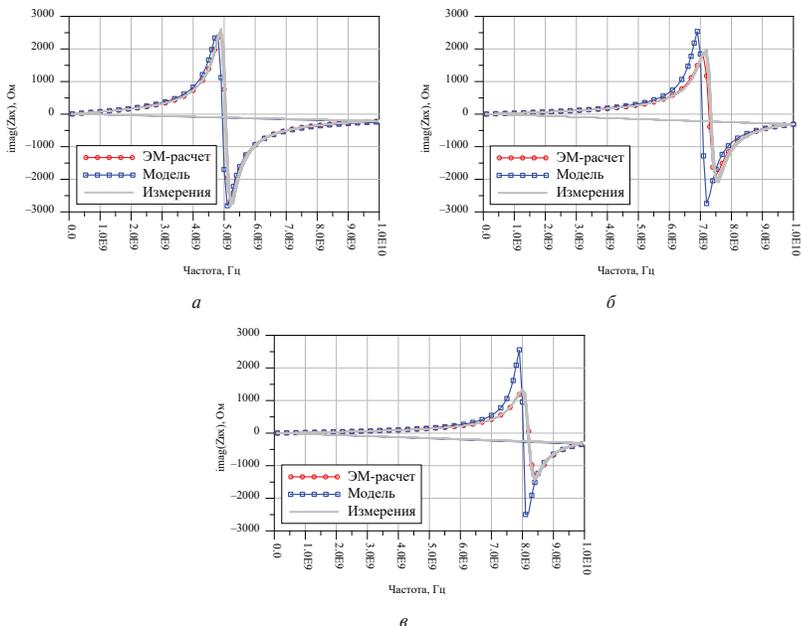


Рис. 2. Графики зависимости мнимых частей входного импеданса от частоты измерений, модели и ЭМ-расчета тестовых модулей

Из графиков зависимостей мнимых частей входного импеданса от частоты видно, что для разных измерений тестовых модулей, разработанной масштабируемой



модели и ЭМ-моделей максимальный сдвиг резонансных частот составляет 300 МГц.

В работе представлены результаты построения параметрического модели круглой спиральной катушки индуктивности по технологии GaAs. Диапазон изменения номинала индуктивности составляет 0,5–25 нГн. Для проверки точности модели изготовлены тестовые модули по технологии GaAs в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Сравнение параметров модели с параметрами тестовых модулей показало, что максимальное расхождение параметров ЭС составляет менее 9% в диапазоне частот до 50 ГГц. Полученные значения точности модели обеспечивают возможность более корректного схемотехнического проектирования МИС СВЧ.

Литература

1. Shih Y. C., Pao C. K., Itoh T. A broadband parameter extraction technique for the equivalent circuit of planar inductors // IEEE Microwave Symposium Digest, 1992. Vol. 3. P. 1345–1348.
2. Nguyen N. M. and Meyer R. G. Si IC-Compatible Inductors and IC Passive Filters // IEEE J. Solid-State Circuits, 1990. Vol. 25. P. 1028–1031.
3. Wheeler H. A. Simple inductance formulas for radio coils // Proc. IRE, 1928. Vol. 16. № 10. P. 1398–1400.



УДК 539.216.2

Новый подход интеграции гетероструктур AlGaIn/GaN и алмазного теплоотвода

Колобкова Е. М., Езубченко И. С., к. ф.-м. н. Занавескин М. Л.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

kolobkovaevg@gmail.com

Предложена новая технология интеграции нитрида галлия и алмазного теплоотвода, которая заключается в уникальной методике формирования подложек из поликристаллического алмаза с тонким слоем кремния и последующей нитридной эпитаксии. Данный подход позволяет понизить температуру активной области транзистора на 50 °С по сравнению с аналогичными элементами НЕМТ GaN/SiC.

Ключевые слова: GaN НЕМТ; нитридные гетероструктуры; алмаз; кремний; аммиачная молекулярно-лучевая эпитаксия.

Темпы технического прогресса в области телекоммуникаций, систем связи и передачи сигнала требуют новых разработок в микроэлектронике, которые бы удовлетворяли растущий запрос на высокие рабочие частоты и высокие удельные мощности выходного сигнала. Для решения этих задач наиболее перспективны нитриды металлов третьей группы и их твердые растворы. Их физико-химические свойства обеспечивают высокую удельную мощность и КПД, надежность работы устройств в непрерывном режиме работы. Однако при работе на высоких мощностях нитридные сверхвысокочастотные (СВЧ) устройства перегреваются и требуют обеспечения эффективного теплоотвода из активной области транзистора. Классические материалы подложек для GaN вроде кремния и сапфира обладают слишком низкой теплопроводностью, что ограничивает потенциал этих технологий.

С 2000-х годов исследователи осваивают новый тип СВЧ-устройств — нитрид-галлиевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) с алмазным теплоотводом. Несмотря на то что данной тематике было посвящено много публикаций, на данный момент не существует общепринятого подхода к формированию теплоотвода из алмаза для нитридных гетероструктур [1].

Нашей научной группой был предложен альтернативный способ создания теплоотвода на основе алмаза для GaN НЕМТ силовой и СВЧ электроники [2]. Новая технология состоит в формировании уникальных составных подложек поликристаллического алмаза с тонким слоем монокристаллического кремния Si (111) и последующем синтезе GaN-гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Экспериментально определены условия контролируемой нитридации поверхности кремниевого слоя на подложках нового типа в процессе эпитаксии GaN. Показано, что растягивающие напряжения в нитридных пленках можно компенсировать сжимающими, накопленными с помощью архитектуры с тремя последовательно выращенными вставками состава $\text{AlN}/\text{AlGaIn}/\text{Al}_{0,365}\text{Ga}_{0,635}\text{N}$, что решает проблему значительных деформаций и растрескивания под действием механических напряжений в эпитаксиальных слоях нитридных гетероструктур. В результате получены гетероструктуры с двумерным электронным газом, электрофизические



характеристики которого находились на уровне приборного качества (концентрация носителей $1,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, подвижность носителей $1600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, слоевое сопротивление $330 \text{ Ом}/\text{кв}$).

Термометрические измерения при рассеиваемой мощности выше $7 \text{ Вт}/\text{мм}$ показали, что использование нового типа подложек позволяет понизить температуру активной области более чем на 50°C по сравнению с подложками карбида кремния. Предложенный подход является перспективным для увеличения выходной мощности устройств на основе нитрида галлия, а также для увеличения их надежности.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Mendes J. C., Liehr M., Li C. Diamond/GaN HEMTs: Where from and Where to? // Materials, 2022. Vol. 15. P. 415–461.
2. Chernykh M. Y., Andreev A. A., Ezubchenko I. S. et al. GaN-based heterostructures with CVD diamond heat sinks: A new fabrication approach towards efficient electronic devices // Appl. Mater. Today, 2022. Vol. 26. P. 101338.

УДК 621.382.323

Нормально-закрытый GaN силовой транзистор на рабочие напряжения до 100 В

Гребенников В. А.^{1,2}, Желаннов А. В.¹, Баранов Г. Б.^{3,4}, Леоненков Е. И.^{3,4}, Дорوفеев А. А.^{3,4}

¹ АО «ОКБ-Планета»

11810446, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13А
grebennikovva@okbplaneta.ru

² Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41

³ ООО «НИИМЭ-МД»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

⁴ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валеева, 6/1

В данной работе представлены результаты разработки отечественного силового транзистора на основе гетероструктуры p-GaN/AlGaIn/GaN/Si. Оптимизированы процессы селективного плазмохимического травления p-GaN и процесс формирования низкоомных омических контактов. Разработана топология для рабочего тока до 10 А и рабочее напряжение до 100 В. Представлены результаты измерений изготовленных транзисторов.

Ключевые слова: p-GaN; E-HEMT; нормально-закрытый транзистор; p-GaN/AlGaIn/GaN/Si-гетероструктуры; селективное плазмохимическое травление; быстрый термический отжиг.

Нормально-закрытые (e-mode) HEMT на основе гетероперехода AlGaIn/GaN благодаря своим уникальным характеристикам в части соотношения V_{bi} & R_{on} , потерь и скорости переключения активно завоевывают рынки потребительской и промышленной электроники в классах устройств 100 и 650 В [1]. Разработка отечественной технологии изготовления GaN силовых транзисторов носит стратегический характер, в частности, для реализации программ развития электрического транспорта, реализуемых госкорпорацией «Росатом».



Рис. 1. Конструкция p-GaN/Al_{0,25}Ga_{0,75}N/GaN/Si-гетероструктуры



В качестве исходного материала в исследовании использовалась гетероэпитаксиальная структура $p\text{-GaN}/\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}/\text{GaN}$, выращенная на подложке из кремния (111), диаметром 100 мм (рис. 1).

На рис. 2 представлена фотография кристалла, разработанного $p\text{-GaN}$ $e\text{-mode}$ НЕМТ. Ширина затвора транзистора составляет $W = 65$ нм (130 единичных затворов шириной 500 нм каждый), длина $p\text{-GaN}$ -затвора $L_z = 1$ мкм, расстояние сток-исток — 15 мкм. Отработан технологический процесс формирования затвора — селективное травление $p\text{-GaN}$ -слоя. Травление проводилось на установке плазмохимического травления ICP в атмосфере $\text{Cl}_2\text{-Ar-O}_2$ (60/10/5 sccm) при значениях ICP и RF мощности 100 и 60 Вт соответственно. Давление в камере составляло 1,2 Па, температура подложки — 0°C . Данный режим обеспечил скорость травления 30 нм/мин и селективность $p\text{-GaN}/\text{AlGaN}$, равную 15. Для формирования омического контакта использована система $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ 15/60/55/50 нм. Быстрый термический отжиг проводился в атмосфере гелия при температуре 780°C в течение 60 сек. с предварительным прогревом 420°C 40 сек., получены омические контакты с сопротивлением менее 0,3 Ом·мм.

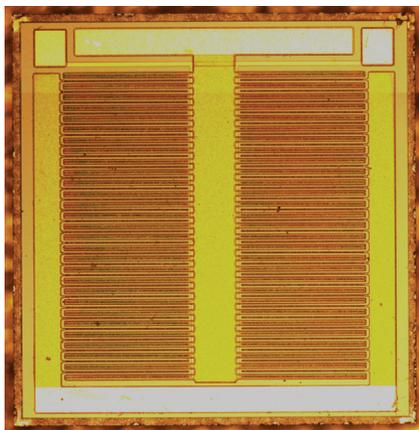


Рис. 2. Кристалл $p\text{-GaN}$ $e\text{-mode}$ НЕМТ. $W_g = 65$ нм, размер кристалла 2×2 мм

Для измерения кристаллы транзисторов были установлены в металлокерамические корпуса (рис. 3).

Измерения проводились на характеристографе Л2-100 ТЕКО. Результаты измерений: ток сток-исток $I_{\text{сmax}} = 13$ А (импульсный режим, длительность импульса около 5 микросекунд, напряжение на стоке 5 В, напряжение на затворе 6 В), сопротивление сток-исток открытого транзистора — 0,33 Ом, пробивное напряжение сток-исток — более 300 В (при напряжении на затворе 0 В).

Также были измерены (при токе стока 10 А):

- время открытия транзистора — 2,4 нс;
- время закрытия транзистора — 2,6 нс;
- время задержки — 5,6 нс.



Рис. 3. Кристалл p-GaN HEMT в металлокерамическом корпусе МК КТ-95С-1

Литература

1. Миядзава Н. и др. Высокомощные HEMT-транзисторы на основе нитрида галлия S-диапазона мощностью 600 Вт и X-диапазона мощностью 200 Вт для импульсного режима // СВЧ электроника, 2018. — № 1. — С. 4–8.



УДК 537.311.322

Несплавные омические контакты к структурам НЕМТ GaN

Добров А. В.¹, Рогачёв И. А.¹, Орехова О. А.¹, Котосонова А. В.¹, Дудинов К. В.¹,
Красник В. А.¹, Каргин Н. И.², Цацульников А. Ф.³, Егоркин В. И.⁴

¹ АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
DobrovVM@mail.ru

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

³ НТЦ микроэлектроники РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

⁴ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Исследованы технологические особенности формирования несплавных омических контактов к GaN НЕМТ с ультратонким барьерным слоем AlGaIn на подложках Si и SiC. Получены удельные сопротивления несплавных омических контактов 0,15 Ом·мм, изготовлен мощный транзистор X-диапазона.

Ключевые слова: омические контакты; СВЧ; нитрид галлия; широкозонные полупроводники; МВЕ; MOCVD GaN НЕМТ.

Требования к электронной компонентной базе (ЭКБ) СВЧ ускоренно растут каждый год. Одной из актуальных задач по развитию отечественной СВЧ-микроэлектроники является развитие технологии изготовления полупроводниковых приборов на основе GaN. Одной из актуальных задач производства приборов на основе нитрида галлия, работающих в частотных диапазонах X, Ku и выше, является получение удельного сопротивления омических контактов порядка 0,1 Ом·мм, что обеспечивает более высокие КПД, мощностные и шумовые характеристики приборов [1].

В данной работе представлена технология получения омических контактов к GaN НЕМТ с применением селективного эпитаксиального роста сильнолегированных слоев GaN и дальнейшего изготовления НЕМТ, реализованная в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Гетероструктуры с ультратонким барьерным слоем AlGaIn были изготовлены в НТЦ микроэлектроники РАН методом MOCVD. Селективный эпитаксиальный рост проводился методами МВЕ (МИЭТ) и MOCVD (НТЦ микроэлектроники РАН).

В качестве исходного материала была использована гетероструктура с тонким барьерным слоем AlGaIn (15 нм) и AlN (1 нм). Несплавной омический контакт представляет собой систему металлов, нанесенную на область с селективно выращенным сильнолегированным слоем GaN [2]. Для получения оптимальных параметров сопротивления перед ростом эпитаксиального слоя N⁺⁺ GaN необходимо удалить барьерные слои, содержащие Al [3]. Был проведен эксперимент по исследованию влияния глубины травления барьерных слоев на удельное сопротивление омических контактов. Процесс формирования несплавного омического контакта представлен на рис. 1.

Измерения параметров удельного контактного сопротивления проходили с использованием метода длинной линии (TLM): сопротивление активного слоя измерялось методом Ван дер Пау. Исходя из параметра сопротивления активного

слоя, определялось контактное сопротивление омических контактов. Результаты представлены на рис. 2.

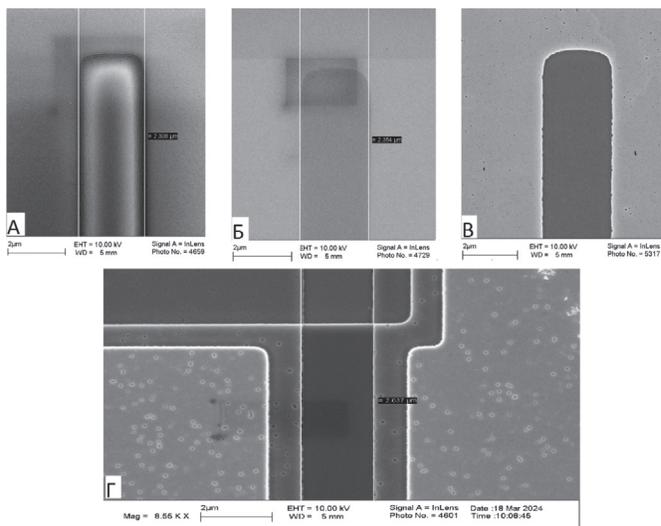


Рис. 1. Процесс формирования несплавного омического контакта: А — формирование маски; Б — травление AlGaIn/AlN; В — выращивание N++ GaN; Г — напыление металла и травление мезаизоляции

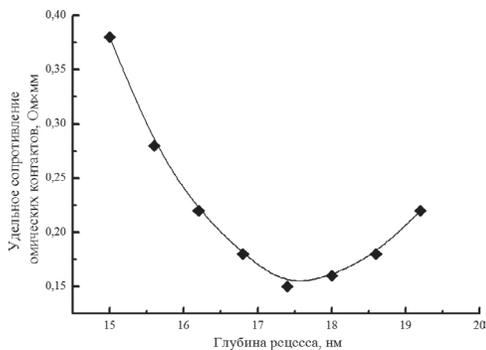


Рис. 2. График зависимости удельного омического сопротивления от глубины травления AlGaIn/AlN

Был изготовлен опытный образец (рис. 3) мощного дискретного СВЧ-транзистора X-диапазона с удельной выходной мощностью 4 Вт/мм, коэффициентом усиления в 15 дБ и КПД 48%, измеренных на частоте 12 ГГц (рис. 4).

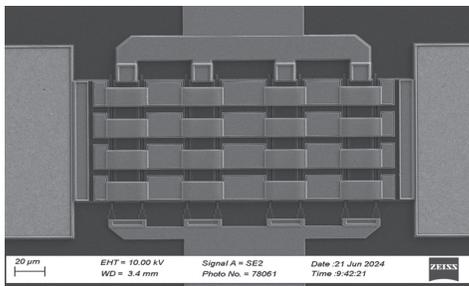


Рис. 3. Фотография опытного образца мощного дискретного GaN HEMT-транзистора, работающего в X-диапазоне частот

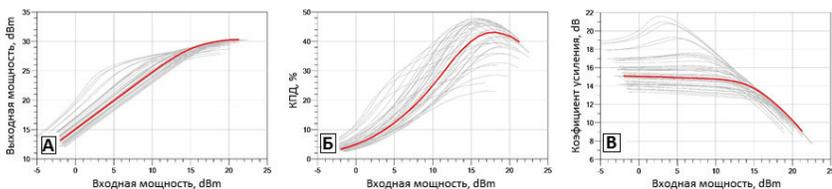


Рис. 4. Измеренные параметры: А — выходная мощность; Б — КПД; В — коэффициент усиления

В работе представлена технология формирования несплавной системы омических контактов с низким значением удельного сопротивления порядка $0,15 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$. Показана зависимость глубины травления приповерхностных барьерных слоев гетероструктуры от значений удельного сопротивления. Изготовлены и измерены опытные мощные дискретные СВЧ-транзисторы X-диапазона с удельной выходной мощностью $4 \text{ Вт}/\text{мм}$, коэффициентом усиления в 15 дБ и КПД 48% , полученные на частоте 12 ГГц . Представленные в работе результаты позволяют создавать ЭКБ СВЧ-приборов на HEMT GaN на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина.»

Литература

1. Çakmak H., Öztürk M., Özbay E. and İmer B. Nonalloyed Ohmic Contacts in AlGaIn/GaN HEMTs With MOCVD Regrowth of InGaIn for Ka-Band Applications // IEEE Transactions on Electron Devices, 2021. Vol. 68. № 3. P. 1006–1010. DOI: 10.1109/TED.2021.3050740.
2. Song B. et al. Ultralow-Leakage AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors on Si With Non-Alloyed Regrown Ohmic Contacts // IEEE Electron Device Letters, Jan. 2016. Vol. 37. № 1. P. 16–19. DOI: 10.1109/LED.2015.2497252.
3. Toprak A., Özbay E. Nonalloyed ohmic contact development with n+ InGaIn regrowth method and analysis of its effect on AlGaIn/GaN HEMT devices // Microelectronics Journal, 2023. Vol. 135. 105762. ISSN 1879-2391. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2023.105762>.

УДК 538.91

Исследование тенденций развития конструкций силовых вертикальных GaN-транзисторовБеляев А. О.^{1,2}, к. ф.-м. н., Баранов Г. В.^{2,3}, Дорофеев А. А., Панасенко П. В.¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
abelyaev@niime.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ ООО «НИИМЭ-МД»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Рассмотрены ключевые особенности, проблемы и перспективы создания силовых вертикальных GaN-транзисторов на собственной подложке. С использованием средств приборно-технологического моделирования разработаны, исследованы и верифицированы модели MOSFET и FinFET конструкции транзисторов с рабочим напряжением 1,2 кВ.

Ключевые слова: силовой транзистор; trench MOSFET; GaN; FinFET.

Среди множества материалов с широкой запрещенной зоной нитрид галлия (GaN) стал ключевым материалом для создания силовых устройств благодаря балансу электрофизических свойств и технологичности [1]. Пьезоэлектрическая природа нитрида галлия позволяет создавать транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT — high electron mobility transistor) в сочетании с высокой концентрацией носителей заряда в канале. Минимальное значение входной емкости и низкое сопротивление затвора обуславливают скорость переключения транзистора на уровне единиц наносекунд, что позволяеткратно снизить форм-фактор источников питания на его основе. Однако горизонтальная конструкция транзистора ограничивает диапазон рабочих напряжений до 650 В из-за технологических сложностей с созданием толстых непроводящих эпитаксиальных слоев твердых растворов $Al_xGa_{1-x}N$ на гетерородных подложках (Si, SiC, Al_2O_3). Вертикальная конструкция силового транзистора ДМОП-типа, известная из кремниевой технологии, способна обеспечить существенное расширение области рабочих напряжений. Продолжительное время сдерживающим фактором в развитии данного конструктивно-технологического направления являлась недоступность собственных подложек GaN. Однако в настоящее время достигнут существенный прогресс и доступны низкорезистивные подложки GaN диаметром 100 мм, что определяет актуальность данного направления.

В настоящей работе рассмотрены конструктивные особенности силовых вертикальных GaN-транзисторов. В работе представлены анализ и сравнение таких конструкций, как CAVET, trench MOSFET, FinFET, JFET и др. [2]. Несмотря на широкое разнообразие вертикальных структур, именно trench MOSFET и FinFET демонстрируют наилучшие характеристики в совокупности с технологичностью изготовления.

С использованием средств приборно-технологического моделирования были разработаны и верифицированы модели trench MOSFET и FinFET, а также



предложены конструктивные подходы для улучшения их электрических характеристик.

Литература

1. Баранов Г. В., Беляев А. О., Дорофеев А. А. и др. Анализ приборных требований к гетероэпитаксиальным структурам AlGaIn/GaN на Si для силовой и СВЧ ЭКБ // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 4 (188). — С. 5–17. — DOI: 10.7868/S2410993222040017. EDN JERFSF.
2. Langpoklakram C. et al. Vertical GaN MOSFET power devices // Micromachines, 2023. Vol. 14. № 10. P. 1937.



УДК 538.91

Глубокие ловушки и диффузионные длины носителей заряда в гетеропереходах NiO/ β -Ga₂O₃

Поляков А. Я.¹, Якимов Е. Б.¹, Саранин Д. С.¹, Черных А. В.¹, Васильев А. А.¹, Гостищев П.¹, Кочкова А. И.¹, Алексанян Л. А.¹, Матрос Н. Р.¹, Щемеров И. В.¹, Пиртон С. Дж.²

¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» 119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
kolyamatro@gmail.com*

² *Университет Флориды*

Gainesville, FL 32611, Соединенные Штаты

Исследованы гетеропереходы NiO/Ga₂O₃ и диоды Шоттки, изготовленные на одинаковых эпитаксиальных структурах. Приведена характеристика структур с точки зрения электрических свойств и диффузионных длин неравновесных носителей заряда. Показано снижение обратного тока в гетеропереходе по сравнению с диодом Шоттки.

Ключевые слова: β -Ga₂O₃; гетеропереход; диод Шоттки; глубокие уровни в запрещенной зоне; выпрямитель.

Оксид галлия бета-полиморфа — это полупроводник с шириной запрещенной зоны около 4,8 эВ, достаточно высокой подвижностью электронов, высокой скоростью насыщения электронов, что делает его очень привлекательным для создания силовых приборов с характеристиками, потенциально сильно превышающими характеристики уже хорошо освоенных широкозонных полупроводников — карбида кремния, нитрида галлия. Однако одним из факторов, сдерживающих использование оксида галлия, является трудность создания в нем *p*-типа проводимости, что позволяет создавать на его основе только монополярные устройства, такие как диоды Шоттки и полевые транзисторы.

Одним из возможных решений может стать использование гетеропереходов с материалами, демонстрирующими значительную проводимость *p*-типа. Для использования в таких структурах были рассмотрены некоторые оксиды переходных металлов, такие как NiO, Cu₂O, Ag₂O и ZnCo₂O. Наиболее перспективным из них является NiO. В данной работе исследуется возможная природа сигналов, похожих на дырочные ловушки, в гетеропереходе NiO/Ga₂O₃ и процессы, связанные с диффузией носителей заряда в таких структурах [1].

Эксперименты проводились на эпитаксиальных структурах β -Ga₂O₃ *n*-типа с ориентацией (001) и толщиной 10 мкм, выращенных методом галоидной газофазной эпитаксии (HVPE) на *n*+ Sn-легированных подложках толщиной 600 мкм. Концентрация нескомпенсированных мелких доноров в пленках составляла $2,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а концентрация электронов в подложке — $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Верхние никелевые контакты Шоттки диаметром 1 мм (толщиной 20 нм) были осаждены методом электронно-лучевого напыления при комнатной температуре. Для выращивания NiO в структурах с гетеропереходом использовался процесс ионно-лучевого напыления.

Полученные результаты подтверждают потенциальное преимущество гетеропереходов NiO/Ga₂O₃ по сравнению с их аналогами — диодами Шоттки. Обратный



ток ниже из-за более высокого барьера для потока электронов на границе гетероперехода, а последовательное сопротивление не сильно отличается от диода Шоттки и уменьшается с ростом температуры. В $p-n$ -переходах, кроме того, обратный ток регулируется потоком неосновных носителей. В гетеропереходах NiO/Ga₂O₃ энергетические барьеры для неосновных носителей (электронов в NiO и дырок в Ga₂O₃) отсутствуют, поскольку выравнивание энергетических зон для этого гетероперехода относится к типу II. Поэтому низкий обратный ток будет обусловлен главным образом тем, что концентрация неосновных носителей в широкозонных полупроводниках очень мала. Длина диффузии неравновесных носителей заряда в части n -типа NiO/Ga₂O₃ ГП выше, чем в диоде Шоттки, приготовленном на той же пластине, что коррелирует с меньшей концентрацией ловушек E2* на n -стороне ГП по сравнению с диодом Шоттки. Спектры адмиттанса NiO/Ga₂O₃ ГП демонстрируют наличие значительного уменьшения емкости с понижением температуры. Энергия активации этого процесса, определенная из спектроскопии адмиттанса, составляет 0,17–0,19 эВ. Этот процесс связан с вымораживанием проводимости в слое p -NiO [1].

Полученные данные могут быть использованы для оптимизации структур выпрямителей на основе оксида галлия.

Работа выполнена в рамках соглашения № 075-15-2022-1113 от 28 июня 2022 г. о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидий в целях реализации федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок», научного исследования «Новые радиационные явления в оксиде галлия и их применение в приборах».

Литература

1. Polyakov A. Y. et al. Trap states and carrier diffusion lengths in NiO/ β -Ga₂O₃ heterojunctions // Journal of Applied Physics, 2024. Vol. 135. № 16.

УДК 53.088.7

К вопросу определения фазовых сдвигов в смесителе

Сердюков В. В.

Кубанский государственный университет

350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149

serdyukov-vladimir1996@mail.ru

Проблемой является выявление погрешностей измерений абсолютных фазовых сдвигов, возникнувших из-за нелинейности. Цель — решение проблемы нелинейности. Результат — метод уменьшения значения погрешностей. Практическая значимость — снижение погрешностей измерений абсолютных фазовых сдвигов.

Ключевые слова: смеситель СВЧ-сигналов; сдвиг фаз; гетеродинное преобразование частоты.

В настоящее время разработаны шесть способов определения сдвигов фаз, возникающих в смесителе при гетеродинном преобразовании частоты:

- метод трех смесителей [1], когда последовательно измеряются сдвиги фаз трех смесителей, один из которых испытываемый, а два других вспомогательные, с последующим вычислением результатов измерений сдвига фаз испытываемого смесителя [2];
- метод двойного преобразования частоты [2], в котором с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) измеряют общий сдвиг фаз двух последовательно соединенных смесителей, применяемых один в прямом, а второй в обратном направлениях, с общим гетеродином; полученный результат делят пополам и приписывают каждому их смесителей;
- метод отражения [2], при котором через смеситель пропускается сигнал в прямом направлении, который на его выходе отражается от нагрузки с известным коэффициентом отражения и возвращается через смеситель на его вход, где измеряют сдвиг фазы между прямым и отраженным сигналами, который равен сдвигу фаз [2];
- метод фазовой опоры, в котором используют ВАЦ, содержащий генератор комбинационных частот, вырабатывающих гармоники путем умножения частоты кварцевого генератора 10 МГц с дискретностью гармоник 10 МГц, которые используют для получения испытательного сигнала, смесителя и сигнала ПЧ, который сравнивают по фазе с выходным сигналом ПЧ, в результате чего измеряют фазовый сдвиг;
- сигнал гетеродина также сравнивают с надлежащей ему гармоникой и измеряют фазовый сдвиг, после вычитают это значение из данного измерения сигнала ПЧ и вносят его в сигнал ПЧ. Сигналы всех гармоник когерентны, поэтому значения соответствуют фазе сигнала кварцевого генератора, умноженной на номер гармоники.

Фазы гармоник отличаются на величину $\Delta\varphi_{П}$, разную для каждой гармоники, что является погрешностью, так как измеряется не истинный фазовый сдвиг, а реплика, отличающаяся от истинного сдвига фаз на величину $\Delta\varphi_{П}$. Поэтому необходима таблица коррекции сдвигов фаз с дискретностью, равной частоте кварцевого генератора.



Методы имеют недостатки. В первом при измерении возникает погрешность из-за согласования входных сопротивлений смесителей. Погрешность измерения фазы при КСВ входов смесителей может достигать 10–15°. Третий метод применим для измерения параметров смесителей и фазы, только когда потери преобразования во всех направлениях равны и не превышают 10 дБ. Второй метод пригоден только для измерения двух идентичных смесителей и непригоден для последовательного соединения с разными потерями преобразования. При последовательном соединении амплитуда сигнала на входе второго смесителя будет меньше, чем амплитуда первого, на величину его потерь преобразования, что приводит к разным сдвигам фаз у обоих смесителей.

Литература

1. Епифанов Е. И., Новиков В. А., Чемес Е. А. Экспериментальные исследования радиочастотных смесителей // Радиотехника, 1988. — № 10.
2. Дансмор Д. П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей / Перевод с английского и научная редакция Е. Ю. Харитонова и др. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — 735 с. ISBN 978-5- 94836-505-3.



УДК 621.382.323

Комплексная разработка технологии изготовления СВЧ монолитных интегральных схем дециметрового диапазона на основе гетероструктур GaAs

Орлова Д. А.¹, Драгуть М. В.^{1,2}, Смирнов Ю. Ю.¹

¹ АО «ОКБ-Планета»

173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1п
OrlovaDA@okbplaneta.ru

² Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 44

Разработана технология СВЧ монолитных интегральных схем дециметрового диапазона и изготовлены опытные образцы тестовых транзисторов на двух типах исходных гетероструктур GaAs. Приведены результаты комплексного анализа характеристик СВЧ рНЕМТ-транзисторов.

Ключевые слова: СВЧ МИС; гетероструктура; арсенид галлия; дециметровый диапазон; рНЕМТ-транзистор.

В настоящее время дециметровый диапазон частот 0,3–3 ГГц является наиболее освоенным, в нем работает значительное количество устройств телекоммуникации, радиолокации и т. д. [1]. Поэтому задача разработки электронной компонентной базы, в том числе и монолитных интегральных схем (МИС), являющихся основой передовой радиоэлектронной аппаратуры, важна и актуальна.

Основные этапы исследования включали разработку конструкции исходной гетероструктуры, топологического проекта, формирование маршрута постростовых операций и изготовление опытных образцов с последующим измерением их параметров. В качестве исходного материала использовались односторонние рНЕМТ-гетероструктуры с селективным легированием. При разработке СВЧ МИС применялись структуры двух типов с различной толщиной барьерного слоя n-GaAs, выращенные на полуизолирующей арсенид-галлиевой подложке при помощи метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). На контрольных пластинах проводилась проверка электрофизических характеристик — подвижности и слоевой концентрации носителей заряда. По результатам испытаний параметры обеих исходных гетероструктур одинаковы ($\mu_n = 6095 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; $n_s = 2,09 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$).

На следующем этапе был разработан топологический проект и технологический маршрут постростовых операций, позволяющий помимо активных элементов (усилительные и ключевые транзисторы) формировать и пассивные (однослойный и двухслойный конденсатор, резисторы, элементы заземления). рНЕМТ-транзисторы изготавливались по самосовмещенной технологии, в которой подзатворная канавка и затвор формируются в одном технологическом цикле. Длина затвора для полевого транзистора, работающего в дециметровом диапазоне, может составлять 1 мкм, она получена при помощи отработанного и производительного процесса контактной фотолитографии.

В процессе исследования СВЧ рНЕМТ-транзисторов, изготовленных на двух типах гетероструктур с толщиной барьерного слоя n-GaAs 10 и 20 нм, были



проведены измерения тестовых структур в целях комплексного анализа статических и высокочастотных параметров.

Таблица 1. Результаты измерений статических и высокочастотных параметров

Статические и высокочастотные параметры транзистора	Толщина барьерного слоя исходной ГС	
	20 нм	10 нм
Максимальная удельная крутизна (мСм/мм)	186,5	206,8
Напряжение отсечки (В)	-2,3	-0,8
Начальный ток стока (мА/мм)	320,6	95
Пробивное напряжение (В)	12	12
Максимальная частота генерации (ГГц)	29	30
Граничная частота (ГГц)	18	15
Сопротивление в открытом состоянии (Ом·мм)	2,47	4,01
Проподная емкость в закрытом состоянии (пФ/мм)	0,252	0,222

Полученные значения транзисторов, а именно максимальная частота генерации и граничная частота, превышают по величине дециметровый диапазон, который варьируется в интервале от 0,3 до 3 ГГц. Исходя из данных результатов, можно судить о том, что данная технология пригодна для изготовления СВЧ МИС в дециметровом диапазоне.

Литература

1. Верхулевский К. Монолитные СВЧ-компоненты Microsemi Corporation для ответственных применений // Компоненты и технологии, 2016. — № 7. — С. 36–42.

УДК 621.382.323

Исследование технологических особенностей изготовления маломощных GaAs рНЕМТ с длиной Т-затвора 150 нм и монолитных интегральных схем на их основе

Шестериков А. Е.¹, Шестерикова Д. А.¹, к. т. н., Ерофеев Е. В.^{1,2}

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

634050, г. Томск, просп. Ленина, 40

² Институт оптики атмосферы им. академика В. Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Исследовано влияние длины рецесса подзатворной области GaAs-транзисторов на их электрические характеристики. На основе подобранных технологических режимов была разработана и изготовлена СВЧ МИС маломощного усилителя с коэффициентом усиления не менее 27 дБ и коэффициентом шума не более 1,6 дБ.

Ключевые слова: рНЕМТ; маломощный транзистор; рецесс подзатворной области; МИС; моделирование; гетероструктура; пассивация.

В настоящее время прогресс в улучшении характеристики монолитных СВЧ интегральных схем (МИС) во многом определяется развитием технологии эпитаксиального выращивания полупроводниковых гетероструктур [1]. Качество выращивания гетероструктуры и структура используемых в ней слоев во многом определяют предельные характеристики получаемых СВЧ полупроводниковых приборов [2]. При разработке технологического процесса крайне важно изначально подобрать гетероструктуру, обеспечивающую наилучшие характеристики разрабатываемых МИС. Для выбора оптимальной конструкции гетероструктуры было произведено моделирование гетероструктуры в программном комплексе Synopsys TCAD в целях определения оптимальной поверхностной концентрации δ -легирования (N_{delta}) и толщины канального слоя транзистора (рис. 1).

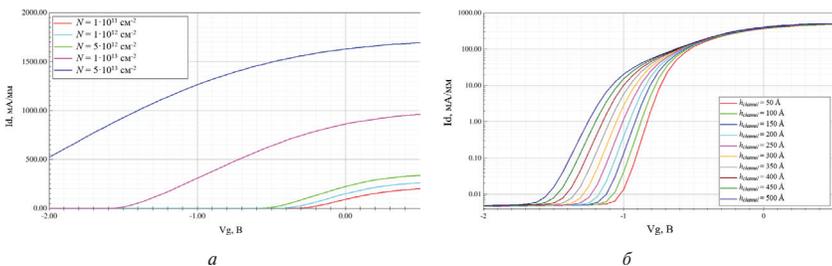


Рис. 1. Результаты моделирования передаточных характеристик транзистора: а) зависимость от концентрации дельта-легирования; б) зависимость от толщины канального слоя

С увеличением концентрации дельта-легирования растет ток стока при фиксированном напряжении на затворе, но при этом увеличивается напряжение отсечки транзистора. Для достижения напряжения отсечки порядка 0,6–0,9 В

минимальная концентрация дельта-легирования должна составлять порядка $(3-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а толщина канального слоя должна находиться в пределах $100-150 \text{ \AA}$. На рис. 2 представлены результаты измерений для образцов с различной входной обработкой перед пассивацией в сравнении с обработкой в изопропиловом спирте при фиксированном времени травления рецесса подзатворной области (t_{etch}).

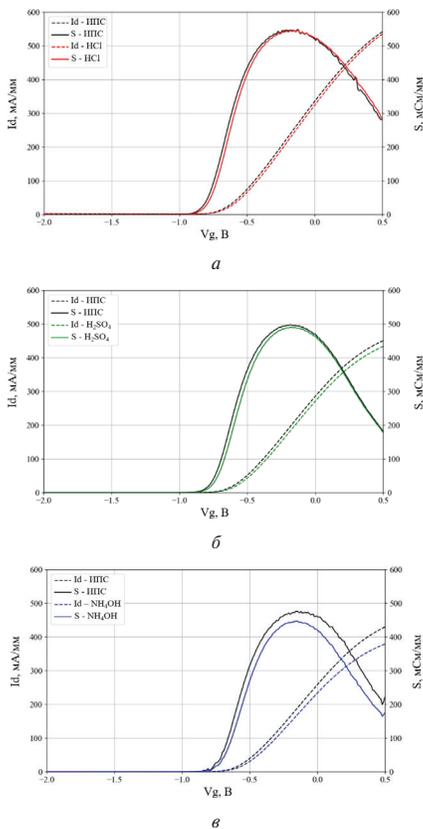


Рис. 2. Результаты измерений для образцов с различной входной обработкой перед пассивацией в сравнении с обработкой в изопропиловом спирте: а) HCl при $t_{etch} = 60$ с; б) H_2SO_4 при $t_{etch} = 90$ с; в) NH_4OH при $t_{etch} = 120$ с

Дополнительная обработка в HCl и H_2SO_4 незначительно ухудшает передаточные характеристики транзистора. Однако при дополнительной обработке образцов в NH_4OH происходит значительная деградация электрических характеристик транзисторов. На основе подобранных оптимальных режимов изготовления рНЕМТ была разработана и изготовлена СВЧ МИС малошумящего усилителя диапазона частот от 8 до 11 ГГц (рис. 3).

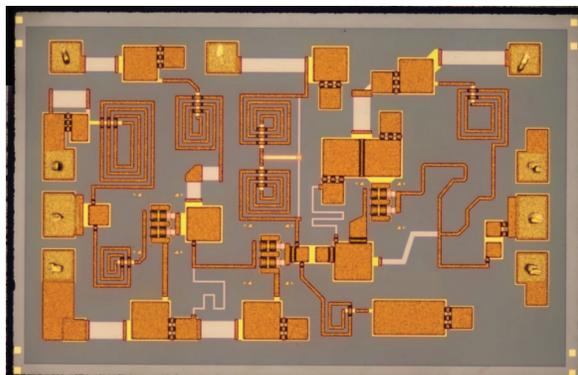


Рис. 3. Топология кристалла СВЧ МИС маломощного усилителя

Результаты измерений СВЧ и шумовых характеристик усилителя представлены в табл. 1. Среднее значение коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот равно 27 дБ. Максимальное значение коэффициента шума составляет 1,6 ГГц.

Таблица 1. Основные характеристики изготовленного маломощного усилителя

Параметр	Значение	Единица измерения
Диапазон частот	8–11	ГГц
Коэффициент усиления	27	дБ
Возвратные потери по входу	–12	дБ
Возвратные потери по выходу	–10	дБ
Коэффициент шума	1,6	дБ
Напряжение питания	5	В
Ток потребления	50	мА
Размер кристалла	1,7×1,1	мм ²

В рамках данной работы были исследованы технологические особенности изготовления маломощных GaAs-транзисторов с длиной T-затвора 150 нм. С помощью моделирования в программном комплексе Synopsys TCAD были подобраны оптимальные характеристики гетероструктуры. В рамках исследования влияния длины рецесса подзатворной области на характеристики НЕМТ выявлено, что с ростом длины рецесса происходит увеличение пробивных напряжений транзисторов вследствие увеличения электрического пути между затвором и стоком. Дополнительная обработка ухудшает электрические характеристики, но позволяет увеличить на 10–20% напряжение пробоя транзисторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.



Литература

1. Chaturvedi A. Review of semiconductor materials for monolithic microwave millimeter wave integrated circuits // *Materials Today: Proceedings*, 2021. 37, 1567–1570.
2. Leuther A., Ohlrogge M., Czornomaz L., Merkle T., Bernhardt F. and Tessmann A. A 250 GHz millimeter wave amplifier MMIC based on 30 nm metamorphic InGaAs MOSFET technology // *2017 12th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, Nuremberg, Germany, 2017. P. 130–133.



УДК 621.315.61

Технология заполнения вертикальных зазоров в квазимонолитных СВЧ-устройствах полиимидом

Гусева Е. А., Аворник Т. В., Аворник О. Ф., Тихонов В. А., Петрова И. В.

АО «ОКБ-Планета»

173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а

gusevaEA@okbplaneta.ru

В данной работе исследовалась технология заполнения вертикальных зазоров в квазимонолитных СВЧ-устройствах. Проведены исследования по использованию фоточувствительного и нефоточувствительного полиимида для заполнения узких глубоких зазоров и получена оценка возможности его использования для данного случая.

Ключевые слова: зазоры; СВЧ-устройство; фоточувствительный полиимид; нефоточувствительный полиимид.

Совершенствование технических характеристик радиолокационных станций неразрывно связано с разработкой и производством СВЧ-компонентов приемопередающих модулей (ППМ) с требуемыми параметрами. Повышение надежности работы, помехозащищенности и помехоустойчивости, снижение массогабаритных параметров требует применения современных подходов при конструировании и изготовлении СВЧ-элементов. Для расширения функциональных возможностей ППМ необходимо использовать высокочастотные монолитно-интегральные схемы (МИС). Для снижения массогабаритных показателей ППМ все чаще применяются инновационные подходы при выполнении сборочных операций, такие как 3D-технологии [1]. За счет интеграции множества кристаллов внутри одного интерпозера, используемые платы могут быть меньшими по размеру, а короткие межсоединения улучшают как электрические характеристики, так и функциональные возможности приемопередатчиков. Потенциальным недостатком такого способа компоновки СВЧ-модулей являются некоторые технологические проблемы, возникающие из-за особенностей конструкции.

В данной работе рассматривается создание технологии заполнения вертикальных зазоров в квазимонолитном СВЧ-устройстве, реализующем комплексную электрическую схему, а именно ППМ АФАР. Он состоит из интерпозера с расположенными в его объеме кристаллами МИС и со сформированной на его лицевой стороне планарной структурой из нескольких чередующихся слоев диэлектрика и металлизации. Вследствие монтажа кристаллов СВЧ МИС в полости интерпозера остается зазор между ними и подложкой.

Из-за наличия зазора возникают следующие технологические сложности: отсутствие контакта при напылении затравочного слоя под формирование переходной металлизации; возникновение дефектов в виде пузырей во время проведения фотолитографии; образование трещин в планаризируемом межслойном диэлектрике. Для устранения всех обозначенных проблем было необходимо подобрать материал и сформировать технологию заполнения зазора между кристаллами СВЧ МИС и интерпозером.

Данные работы выполнялись с использованием двух видов полиимида в качестве такого материала. Для светочувствительного полиимида Sun-Pi100



от компании Suntific Materials был проведен подбор режима фотолитографии на тестовых образцах без развитого рельефа и образцах с наличием вертикальных зазоров. Для несветочувствительного полиимида АД-9103 ИС от компании МИПП-НПО «Пластик» были проведены исследования по заполнению вертикальных зазоров с оценкой адгезии и возможности как его плазмохимического удаления, так и стойкости полиимида к некоторым технологическим операциям по созданию квазимонолитного СВЧ-устройства. Было представлено заключение по проведенным экспериментам, а именно возможности использования двух видов полиимида для заполнения вертикальных зазоров, и были сформулированы предложения по совершенствованию сформированной технологии.

Литература

1. Васильев А. Современные технологии 3D-интеграции // Компоненты и технологии, 2010. — № 102. — С. 156–158.

УДК 621.3.049.776.422:621.396.96

Исследование проблем теплового распространения в малогабаритных СВЧ приемо-передающих модулях АФАР

Панасенко П. В., д. т. н., Волосов А. В., к. т. н., Пяточкин М. Д.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

ppanasenko@niime.ru, avolosov@niime.ru, ppyatochkin@niime.ru

Рассмотрены особенности теплоотвода для различных конструктивов СВЧ приемо-передающих модулей см- и мм-диапазонов частот. Показано, что исследованные конструктивы могут использоваться в качестве базовых решений при создании ППМ, для обеспечения улучшенного рассеивания тепла и повышения КПД подсистемы.

Ключевые слова: СВЧ приемо-передающий модуль; активная фазированная антенная решетка; кремниевая коммутационная плата; TSV-интерпозер.

Одной из главных тенденций, утвердившихся в последние десятилетия в развитии связных и радиолокационных систем различного назначения, является их реализация на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР).

Одним из ключевых элементов систем АФАР является приемо-передающий модуль (ППМ), который строится на основе полупроводниковой электронной компонентной базы, представленной в виде монолитных интегральных схем (МИС) различного функционального назначения. Уровень излучаемой в согласованном тракте выходной мощности современных СВЧ МИС может достигать 25 Вт и более, что при КПД (25–40) % приводит к большим значениям рассеиваемой мощности и требует организации эффективных систем теплоотвода. Ситуация усугубляется тенденциями к миниатюризации конструкции ППМ и использованию сложно-функциональных СВЧ СнК, что обусловлено требованиями к шагу антенной решетки АФАР в половину длины излучаемой волны. Так, при частоте 10 ГГц габаритные размеры в плоскости антенного полотна модуля не должны превышать 15×15 мм [1]. Проблематика усугубляется ростом требуемых излучаемых уровней мощности СВЧ-сигнала, а также переходом на дешевые менее энергоэффективные технологии.

В работе выполнен анализ базовых конструктивных технологических решений, физических и технических ограничений в отношении приемо-передающих модулей в целом. Проведен аналитический обзор конструкций и технологий проектирования систем теплоотводов в многокристалльных 2.5D и 3D электронных узлах. Разработаны и верифицированы тепловые модели 2.5D–3D-микросборок, применимые для моделирования различных приемо-передающих модулей систем АФАР. Предложены конструктивные решения конструктивно-технологической реализации и оценена эффективность различных систем теплоотвода для ППМ, построенных на основе TSV-интерпозера.

Определены условия максимальной эффективности системы теплоотвода на основе TSV-интерпозера. Разработан способ построения 3D-модели кристаллов из топологических файлов, который позволяет значительно сократить временные затраты на исследования и создание модели.



Существующие системы теплоотвода в ППМ представляют собой тепловые стоки в низкотемпературной совместно обжигаемой керамике (ЛТСС) и печатные платы на полимерной основе, их теплоотвод ограничен количеством теплостоков и имеет неудовлетворительные характеристики [2]. Одним из альтернативных подходов к организации систем теплоотвода, предложенным в данной работе, является охлаждение ППМ за счет адиабатического расширения газа, протекающего в объеме Si интерпозера или металлического основания. Предложена система теплоотвода ППМ, построенная на принципе адиабатического расширения газа и обладающая более высокой эффективностью по отношению к системам с циркуляцией охлаждающей жидкости при габаритах ППМ не менее 400 мм².

Литература

1. Красников Г. Я., Панасенко П. В., Волосов А. В. Конструктивно-технологические принципы создания СВЧ-элементной базы нового поколения на основе объемных технологий современной кремниевой микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 3 (163). — С. 10–22.
2. Панасенко П. В., Волосов А. В., Ионов А. С., Красников Г. Я., Петров А. В. Малогабаритные мощные приемо-передающие модули X-диапазона для АФАР // Наноиндустрия. Спецвыпуск 4s. — Т. 13 (99). — С. 404–406.

УДК 621.3.049

Измерение электродинамических характеристик материала для производства малогабаритных антенн с помощью аддитивных технологий

Бурлаков К. А., Насибуллин Д. А.

УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
k.a.burlakov@urfu.ru, d.a.nasibullin@urfu.ru

Работа посвящена исследованию электродинамических свойств материалов, используемых для создания малогабаритных антенн с применением аддитивных технологий. В работе описаны методы, позволяющие определить диэлектрическую и магнитную проницаемость фотополимера на низкой и высокой частоте.

Ключевые слова: характеристики материалов; аддитивные технологии; антенны; СВЧ.

Малогабаритные антенны получили широкое применение в мобильных устройствах, автономных транспортных средствах, медицинских устройствах, космических технологиях, а также в Интернете вещей [1] и 5G [2]. В данных областях основными требованиями являются малые размеры, низкие масса и стоимость производства. Для достижения заданных требований существует множество решений. В настоящее время с использованием аддитивных технологий и новых материалов можно создавать антенны с уникальными свойствами, улучшенной эффективностью и еще меньшими размерами. Для производства таких устройств необходимо знать свойства материалов, из которых они будут изготавливаться.

Для измерения диэлектрической проницаемости смолы на низкой частоте был изготовлен образец в виде плоского конденсатора. Зная его емкость и габаритные размеры, можно рассчитать его диэлектрическую проницаемость по известной формуле. Для измерения магнитной проницаемости был изготовлен диэлектрический цилиндр, который помещался внутрь катушки индуктивности.

Измерения электродинамических характеристик полимера на высокой частоте осуществлялись путем изменения длины микрополосковой линии, что приводило к изменению фазы коэффициента отражения S_{11} .

Также диэлектрическую и магнитную проницаемость диэлектрика можно измерить с помощью метода NRW [3], расположив образец между двумя волноводами.

Используя полученные характеристики фотополимерной смолы, провели электродинамическое моделирование диэлектрической резонаторной антенны.

Литература

1. Chietera F. P., Colella R. and Catarinucci L. The Promising Role of 3D-printed Dielectric Resonator Antennas in the IoT Framework // 2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), Bol and Split, Croatia, 2021. P. 1–4. DOI: 10.23919/SpliTech52315.2021.9566416.



2. Zhu Y.-Y., Wang J., Chen J.-X. and Wu W. A Compact Wideband Dual-Polarized Antenna Using Monolithic Dielectric for 5G Base Station Application // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022. Vol. 21. № 9. P. 1717–1721. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3173085.
3. Kuek Chee Yaw. Measurement of Dielectric Material Properties // Rohde & Schwarz, 2012. RAC-0607-0019. 36 p.

УДК 621.3.049

Генерация геометрии антенны с заданной диаграммой направленности

Бурцев В. Д., Филонов Д. С.

Центр фотоники и двумерных материалов,
Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 7
burtsev.vd@phystech.edu

В данной работе описывается алгоритм извлечения дальнего электрического поля из информации о диаграмме направленности антенны и ее поляризации, а также приводится пример получения геометрии антенны, обеспечивающей такие показатели, на основе анализа модового состава.

Ключевые слова: обратная задача; радиофизика; мультипольное разложение; вычислительная электродинамика.

На данный момент в перспективных системах связи избирательное излучение сигнала является технически сложной задачей. Например, формирование диаграммы направленности с выколотым сектором или многонаправленной диаграммы требует подбора большого количества параметров, а фундаментального решения поставленная задача не имеет [1]. Как правило, существующие решения только аппроксимируют входные данные о диаграмме и сводятся к следующим вариантам: метод апертурного синтеза антенных решеток, метод обратного распространения для метаповерхности или итеративный алгоритм эвристического поиска [2–4].

В данной работе предлагается альтернативный способ поиска целевой геометрии излучателя, основанный на анализе информации о макроскопических характеристиках испускаемого им электромагнитного поля, — диаграмме направленности и карте поляризации. Все вычисления происходят в сферических координатах в дальней зоне источника. На первом шаге по излучаемой мощности и осевому соотношению эллипса поляризации оценивается вектор электрического поля в каждой точке. Затем по восстановленной карте электрического поля восстанавливается спектр мультипольных коэффициентов, однозначно отображающий возбужденные в системе гармоники. На последнем этапе мультипольный спектр аппроксимируется известными комбинациями антенных элементов, а их итоговое сочетание моделируется при помощи метода конечных элементов для подтверждения работоспособности алгоритма.

Литература

1. Тихонов А. Н., Дмитриев В. И. О методах решения обратной задачи теории антенн // Вычислительные методы и программирование. — Вып. XIII. — М.: изд-во МГУ, 1969. — С. 209–214.
2. Zhao X., Lin H., Chen H. et al. Back-propagation-assisted inverse design of structured light fields for given profiles of optical force // Nanophotonics, 2023. Vol. 12. № 11. P. 2019–2027.
3. Epstein A. and Eleftheriades G. V. Huygens' metasurfaces via the equivalence principle: design and applications // J. Opt. Soc. Am. B, 2016. Vol. 33. № 2. P. A31.
4. Bossard J. A., Lin L., Yun S. et al. Near-Ideal Optical Metamaterial Absorbers with Super-Octave Bandwidth // ACS Nano, 2014. Vol. 8. № 2. P. 1517–1524.



УДК 621.3.049

Учет условий эксплуатации при оценке электродинамических характеристик материалов

Кривоногова Д. Е., Малкин А. И.

УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

krivonogova.daria@urfu.me

Рассмотрен вопрос измерения электродинамических характеристик материалов при отрицательных температурах. Разработана модель оснастки, позволяющая проводить измерения при температурах до -150°C .

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость; магнитная проницаемость; S-параметр.

Современный процесс разработки новых изделий радиоэлектроники подразумевает создание цифровых двойников. Основной задачей является обеспечение максимально полного соответствия электродинамической модели цифрового двойника реальному изделию. Для этих целей недостаточно знать электродинамические параметры материалов только в определенных условиях измерения, таких как температура и влажность. Только учет зависимости комплексных значений диэлектрической и магнитной проницаемости, входящих в состав изделия материалов, от указанных величин позволит получить электродинамическую модель, близкую к реальности.

В ходе выполнения работы по учету условий эксплуатации при оценке электродинамических характеристик материалов был разработан измерительный комплекс, в котором в качестве способа охлаждения образца используется жидкий азот. Особенностью такого метода является резкий скачок температуры образца материала до -150°C . При этом в комбинации процессов конденсации воды с поверхности волновода и кристаллизации воды под воздействием низкой температуры возникает иней, который обладает собственными значениями комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости [1]. Чтобы не допустить появления инея, реализована система вакуумирования измерительной линии. Для создания вакуума будет использован масляный одноступенчатый воздушный компрессор который способен создавать давление до 10^{-3} Торр.

Для измерения электродинамических характеристик планируется использовать метод линии передачи. Он объединяет в себе такие распространенные типы линий передачи, как коаксиальная линия с воздушным заполнением, волноводная линия передачи. Исследуемый образец материала будет помещаться в охлаждаемую линию передачи. Вычисление комплексных диэлектрической и магнитной проницаемости будет проводиться с использованием математического аппарата NRW [2].

В результате разработки измерительного комплекса создана модель измерительной оснастки и подобраны все необходимые комплектующие для изготовления натурального образца измерительного комплекса.

Литература

1. So H., Senesky D. G. Effect of Frost Formation on Operation of GaN Ultraviolet Photodetectors at Low Temperatures // IEEE Sens. J., 2017. Vol. 16. № 15. P. 4752–4756.
2. Malkin A. I., Knyazev N. S. Dielectric permittivity and permeability measurement system // CEUR Workshop Proceedings. CEUR Workshop Proceedings, 2017. Vol. 1814. P. 45–51.

УДК 621.3.049

Фазированная антенная решетка для низкоорбитальных спутниковых группировок

Филонов Д. С., Никулин А. В.

Центр фотоники и двумерных материалов,
Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 7
filonov.ds@mipt.ru

Описываются этапы проектирования и изготовления фазированной антенной решетки Ку-диапазона для задач спутниковой связи с низкоорбитальными группировками, подразделяемой на передающую и приемную подрешетки, работающие в диапазонах 14,0–14,5 и 10,95–11,7 ГГц соответственно.

Ключевые слова: спутниковая связь; фазированная антенная решетка; СВЧ-техника; низкоорбитальная спутниковая группировка.

В период до 2030 года в рамках развития отечественных низкоорбитальных спутниковых группировок осуществляется технологическая модернизация в областях систем связи нового поколения и беспилотных аппаратов. В отрасли связи «земля — космос» на данный момент наиболее научно и технически разработанным продуктом являются фазированные антенные решетки [1, 2], однако в то же время еще не существует готовых решений для полностью отечественных антенных решеток, отвечающих аппаратным требованиям спутников на низкой орбите.

В данной работе представлены результаты проектирования, изготовления и измерения фазированной антенной решетки Ку-диапазона, разрабатываемой в рамках обозначенной задачи. Физическая реализация решетки основывается на технологии печатных плат. В качестве элементарного излучателя используется круглая патч-антенна с круговой поляризацией, обеспечиваемой гибридным СВЧ-мостом на нижнем слое, а также вынесенным паразитным патчем-директором на верхнем слое для увеличения направленности всей структуры [3]. Итоговая фазированная антенная решетка представляет из себя совмещенную систему из приемной (40×24 элементов, 10,95–11,7 ГГц) и передающей (52×24 элементов, 14,0–14,5 ГГц) подрешеток. Основными атрибутами представленной решетки являются одна электрическая и одна механическая оси сканирования: электрическое сканирование по углу места осуществляется путем изменения фазы в СВЧ-тракте на фазоформирующем чипе, механическое сканирование по азимуту — путем осевого вращения всей структуры.

Литература

1. He G. et al. A review of multibeam phased array antennas as LEO satellite constellation ground station // IEEE Access, 2021. Vol. 9. P. 147142–147154.
2. Han G. et al. A novel hybrid phased array antenna for satellite communication on-the-move in Ku-band // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015. Vol. 63. № 4. P. 1375–1383.
3. Nikulin A. V. et al. Towards phased array antenna operating in Ku-band for satellite communications // Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2024. Vol. 58. P. 101216.



УДК 621.396.6

Фазированная антенная решетка для терминалов спутниковой связи Ка-диапазона

Цитович А. А.¹, Кучмий А. Д.^{1,2}, Кузнецов В. В.¹, Плотников И. С.¹,
Дехтярь Т. А.^{1,2}

¹ АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

² Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет)

125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4

Разработана структурная схема построения активной фазированной антенной решетки (АФАР) терминала спутниковой связи Ка-диапазона длин волн. Разработан функциональный фрагмент АФАР, позволяющий добиться масштабируемости апертуры и тем самым обеспечивающий возможность изменения тактико-технических характеристик без серьезных затрат на модернизацию устройства.

Ключевые слова: антенные решетки спутниковой связи; микрополосковые антенные решетки; активные антенные решетки; цифровые антенные решетки; плоские антенны; излучающий элемент; система излучения; электрическое сканирование.

В последнее десятилетие во многих странах мира активно проводятся поисковые научно-исследовательские работы (далее — НИР) и опытно-конструкторские работы (далее — ОКР), целью которых является поиск технических решений для создания недорогих плоских сканирующих антенн (Flat-panel antennas, FPA) [1]. Сегодня главным драйвером для этого является возрастающее количество планируемых сценариев предоставления услуг широкополосного доступа (далее — ШПД) на подвижных объектах [2, 3].

Статья посвящена разработке фазированной антенной решетки в формате FPA по модульному принципу для возможности проведения масштабирования с учетом сценария использования терминала спутниковой связи. Проведен электродинамический анализ излучающего элемента и расчет диаграммообразующей схемы.

Литература

1. Овчинникова Е. В., Гаджиев Э. В., Кондратьева С. Г., Поландов А. Л., Шмачилин П. А., Соков М. А., Волков О. А. Антенные решетки спутниковых мобильных теллекоммуникационных систем // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2021. — Т. 182. — № 3.
2. Nicholson J. Status of the Mobile User Objective System // Military Communications Conference (MILCOM), 2006. P. 1–4.
3. Marcellini L., Lo Forti R., Bellave-glia G. Future developments trend for Ku and Ka antenna for satcom on the move // Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on, 2011. P. 2346–2350.



УДК 621.382.3

Экспериментальное исследование температурных характеристик элементов на пластине GaAs в СВЧ-диапазоне частот

Цунваза Д., д. т. н. Каргин Н. И., к. т. н. Рыжук Р. В., д. ф.-м. н.
Васильевский И. С., Неволина Т. Н., Клоков В. А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
tsdamir321@gmail.com

Представлены экспериментальные результаты исследования температурных характеристик элементов на пластине GaAs для СВЧ МИС. Измерения параметров компонентов проводились при температурах до 125 °С и частотах до 50 ГГц. Получены зависимости величины ключевых параметров исследованных устройств от температуры.

Ключевые слова: СВЧ-диапазон; монолитные интегральные схемы; температурные характеристики.

Современные электронные устройства эксплуатируются в различных условиях окружающей среды. Факторы температуры, излучения и стабильности питания радиоэлектронной аппаратуры значительно влияют на эффективность функционирования того или иного прибора. Таким образом, возникает проблема прогнозирования надежности и отказоустойчивости электронных компонентов, а также необходимость изучения их поведения при помещении в экстремальные рабочие условия.

Кроме того, понимание зависимости характеристик устройств от внешних условий способствует корректировке технологического процесса в целях повышения эффективности разрабатываемой электронной аппаратуры. Так, например, одним из этапов техмаршрута является формирование диэлектрического слоя нитрида кремния, свойства которого определяются его стехиометрическим составом, который может несколько отличаться от Si_3N_4 . Эти отличия будут влиять на величину диэлектрической проницаемости и, как следствие, тангенса угла диэлектрических потерь, что в свою очередь влияет на величину граничной частоты устройства. Учитывая, что монолитные интегральные схемы (МИС) используются в различных температурных режимах, эти характеристики могут сильно меняться и выходить за границы допустимого отклонения. Таким образом, исследование температурных характеристик компонентов для МИС СВЧ-диапазона частот является важной и актуальной задачей.

В качестве экспериментальных образцов использовались SiN_x МДМ-конденсаторы, планарные катушки индуктивности и TaN тонкопленочные резисторы, изготовленные в Центре радифотоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ [1]. Измерительный стенд состоял из векторного анализатора цепей PNA-X и зондовой станции MPI TS200-IFE. Исследование характеристик пассивных компонентов проводилось в температурном диапазоне 25–125 °С с шагом 25 °С при частотах до 50 ГГц и мощности СВЧ-сигнала –10 дБм. Контроль параметров конденсатора,



резистора и катушки индуктивности осуществлялся путем анализа измеренных параметров импеданса:

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right), \text{ откуда}$$

$$R = \operatorname{Re}(Z); C = -\frac{1}{\operatorname{Im}(Z) \cdot \omega}; L = \frac{\operatorname{Im}(Z)}{\omega}.$$

Показано, что изменение температуры окружающей среды существенно влияет на характеристики компонентов СВЧ МИС. Так, например, емкость конденсатора нелинейно увеличилась более чем на 15% при нагреве на 100°C в частотном диапазоне 10–20 ГГц [2].

Результаты исследования температурных характеристик пассивных компонентов легли в основу работы по уточнению моделей для СВЧ МИС, а также способствуют корректировке технологического процесса.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра радиофотоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ в рамках программы «Приоритет-2030».

Литература

1. Васильевский И.С. и др. Разработка отечественного техпроцесса 0,15 мкм РНЕМТ для МИС СВЧ МШУ // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. — Омск, 2022. — С. 75–83.
2. Цунваза Д., и др. Исследование температурных характеристик пассивных элементов на основе гетероструктуры соединений АПШAs // Мокеровские чтения: Сборник трудов. — М.: НИЯУ «МИФИ», 2024. — С. 49–50.



УДК 621.371

Обзор моделей радиоканалов современных систем связи

Михайлов В. Ю.^{1,2}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

vmikhaylov@niime.ru

В статье описаны модели радиоканалов, используемые при разработке устройств и систем подвижной связи. Представлен обзор известных моделей радиоканалов, их характеристики, особенности и условия использования. Проведен анализ применимости моделей для NB-IoT.

Ключевые слова: 5G; LTE; радиоканал; моделирование.

При проектировании систем радиосвязи необходимо учитывать эффекты, возникающие при распространении радиоволн, особенно эффекты многолучевого распространения, которые являются основными для систем радиосвязи в городских условиях, офисных и промышленных помещениях и условиях сложных рельефов. Также эти эффекты необходимо учитывать и при разработке оконечных устройств, так как некоторые стандарты, например LTE или 5G, используют собственные модели радиоканалов [1], которые применяются [2] при функциональном исследовании устройств, работающих в рамках данных стандартов. Поэтому при создании микросхем приемо-передающих модулей для оконечных устройств на основе микроэлектронных технологий [3] на этапе проектирования необходимо моделировать работу системы с учетом радиоканала.

На текущий момент существует несколько подходов при создании модели каналов:

- расчет потерь с использованием моделей распространения радиоволн;
- представление канала в виде импульсной характеристики;
- пространственный подход, учитывающий расположение приемника и передатчика, а также диаграммы направленности антенн;
- трассировка лучей.

Построение строгих математических моделей, описывающих характер распространения радиоволн для городских условий, практически невозможно, поэтому на практике применяются различные приближенные модели, которые позволяют оценить уровень сигнала в точке приема. Выделяют шесть типов математических моделей распространения радиоволн [4], но для инженерных расчетов применяются в основном эмпирические модели:

- детерминированные;
- статические;
- полудетерминированные;
- полустатические;
- полуэмпирические;
- эмпирические.



Вторым вариантом является представление радиоканала в виде импульсной характеристики основной полосы частот:

$$h_b(t) = \sum_k \alpha_k \delta(t - \tau_k), \quad (1)$$

где α_k — коэффициент ослабления, τ_k — временная задержка k -го канала относительно первого канала.

При движении приемного или передающего устройства канал будет меняться, так как возникает эффект Доплера. В таком случае импульсную характеристику можно оценить как

$$h_b(t) = \sum_k \alpha_k \cdot e^{j2\pi f_D t} \cdot \delta(t - \tau_k), \quad (2)$$

где f_D — доплеровская частота.

Таким образом, канал представляет собой линии задержки с отводами на фиксированных позициях. Данный тип модели радиоканала применяется при разработке LTE-устройств (модели EPA, EVA, ETU) и модели TDL для 5G.

Пространственный подход предполагает, что местоположения передающего устройства и приемного известны в рамках локальной или глобальной систем координат. Подход представляет собой модифицированную импульсную характеристику канала, которая учитывает углы азимута и/или возвышения прихода. Примером такого подхода является модель CDL, которая применяется при моделировании и исследовании устройств 5G. Она построена на основе модели WINNER и рассматривает пять вариантов каналов (CDL-A, CDL-B, CDL-C ориентированы на распространение при отсутствии прямой видимости; CDL-D, CDL-E используются при наличии прямой видимости).

Таким образом, при разработке микросхем приемо-передающих модулей на этапе моделирования наиболее оптимальным является использование или модели распространения радиоволн, или модели представления канала в виде импульсной характеристики.

Литература

1. 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 17.0.0 Release 17).
2. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part I: Conformance testing (3GPP TS 36.521-1 version 17.7.0 Release 17).
3. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.
4. Попов В. И. Распространение радиоволн в лесах. — М.: Горячая линия, 2015. — 392 с.

УДК 621.396

Улучшение эффективности проектирования объемных СВЧ-меток через интеграцию методов машинного обучения

Пискун И. А.¹, Тельминов О. А.¹, Резник А. Ю.²¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

ipiskun@nime.ru

² АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Работа посвящена применению методов машинного обучения для повышения эффективности проектирования антенн для СВЧ-радиометок.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация; антенна; СВЧ; машинное обучение.

Системы радиочастотной идентификации [1] играют ключевую роль в автоматической идентификации объектов. Радиочастотные метки, представляющие собой важный элемент этих систем, имеют разнообразную конструкцию, включающую в себя антенну и чип [2]. Делятся на плоские или объемные идентификаторы, адаптированные к различным объектам.

Для разработки объемных меток необходимо обладать высокой квалификацией в области численного моделирования и использования специализированных программных средств. Кроме того, создание эффективных трехмерных антенн требует значительного опыта и тщательного анализа различных конфигураций.

Для упрощения проектирования объемных СВЧ-меток можно применять методы машинного обучения и нейронные сети. Алгоритмы машинного обучения могут использоваться в целях проектирования антенн, учитывая различные факторы, такие как материалы и их параметры, физические размеры антенн. Нейронные сети [3] могут обучаться на больших объемах данных и предсказывать оптимальные параметры для достижения заданных характеристик метки.

Новизна работы заключается в применении нейронной сети для регрессии методом машинного обучения для определения параметров антенны, обеспечивающей согласование с чипом на необходимой частоте.

В результате работы написана и обучена нейросеть с двумя скрытыми слоями, предсказывающая значение резонансной частоты на основании три входных параметров: длины антенны, диэлектрической проницаемости керамической основы и ширины антенны. Получаемые при предсказании значения резонансной частоты имеют незначительную погрешность относительно численного моделирования не более 4 МГц (0,5% от значения резонансной частоты).

Использование нейронных сетей для оптимизации процесса проектирования антенн и радиочастотных меток может значительно сократить время и ресурсы, необходимые для создания эффективных устройств.

Литература

1. Dobkin D. The RF in RFID: UHF RFID in practice. Newnes, 2012.
2. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — С. 205–238.
3. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series). The MIT Press, 2016.



УДК 621.3.011.3, 004.942

Численное моделирование индукционных катушек антенн для идентификации подземных инфраструктурных сетей

Соболев И. А.^{1,2}, Резник А. Ю.², Тельминов О. А.¹¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

isobolev@niime.ru

² АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Работа посвящена моделированию и разработке индукционной катушки антенны маркера для поиска и идентификации подземных коммуникаций. По результатам расчета выбрана комбинированная катушка. Дальность считывания созданного прототипа превышает 1 м. Измеренные параметры показывают высокую сходимость с теоретическими данными.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация; индукционная катушка; НЧ; добротность; подземные коммуникации.

В современном мире подземные коммуникации играют жизненно важную роль, в частности они обеспечивают передачу электроэнергии, информации, подачу и отвод воды. Однако доступ к таким инфраструктурным сетям затруднен, что делает их потенциально опасными при проведении строительных или ремонтных работ. Одним из способов упрощения взаимодействия с ними является использование радиочастотных меток RFID [1–3].

Маркировка подземных коммуникаций необходима для идентификации различных типов подземных инфраструктурных сетей. Существует несколько способов маркировки подземных коммуникаций. Например, установка физических маркеров — опознавательных столбиков. Наиболее перспективный способ — электронная маркировка метками и считывание их в переменном магнитном поле в диапазоне 60–170 кГц. Эти метки представляют собой колебательный контур, состоящий из двух основных элементов: индукционной катушки, выступающей в роли антенны, и конденсатора. Для записи такой информации, как собственник или дата установки, используется чип [4]. Такие метки называются активными.

На сегодняшний день существующие аналоги меток имеют ограниченную дальность считывания. Необходимо разработать маркер, позволяющий с высокой точностью определять место и тип коммуникации на глубине до 1 м.

Для определения параметров катушки возможно использование уравнений Максвелла или эмпирических формул [5–7]. Эти методы либо достаточно сложны для практических расчетов, либо недостаточно точны, либо неприменимы для расчета катушек сложной формы. Поэтому оптимальным вариантом является моделирование в программном обеспечении, основанном на методе конечных элементов.

Исследовались три цилиндрические катушки с различным количеством слоев, а также катушка сложной формы, представляющая собой комбинацию двух типов катушки. По результатам расчета определено, что комбинированная катушка имеет оптимальные параметры, поэтому такая катушка была выбрана для создания прототипа.

На основе проведенных исследований был разработан опытный образец маркера подземных коммуникаций. Этот образец представляет собой комбинированную катушку, сочетающую в себе два типа намотки, что обеспечивает оптимальные параметры для высокоточной идентификации подземных структур. При помощи RLC-метра были измерены параметры прототипа на частоте 100 кГц. Расхождение составило не более 10%. Проведенные испытания показали, что образец успешно определяет местоположение и тип коммуникаций на глубине до 1,4 м.

В результате моделирования различных индукционных антенн была определена оптимальная конструкция. Создание опытного образца подтвердило, что его характеристики соответствуют теоретическим расчетам с учетом допустимых отклонений. Моделирование катушек в программном обеспечении на основе метода конечных элементов показало свою высокую эффективность и точность в определении параметров катушек сложной формы.

Литература

1. Дшунян В.Л., Шаньгин В.Ф. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты — М.: АСТ; НТ Пресс, 2004.
2. Финкенцеллер К. RFID-технологии: Справочное пособие / Пер. с нем. Сойунханова Н.М. — М.: ДМК Пресс, 2016.
3. Zubov I. A., Losevskoy A. Y., Ermakov I. V., Nuykin A. V., Kravtsov A. S. An UHF RFID Tag Design in a Single-Poly 90 nm CMOS Process // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, St. Petersburg and Moscow, 27–30 января 2020 года. St. Petersburg and Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 208–211.
4. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — С. 205–238.
5. Lundin A. Handbook Formula for the Inductance of a Single-Layer Circular Coil // Proc. IEEE, 1985. Vol. 73 (9). P. 1428–1429.
6. Knight D. W. Practical continuous functions for the internal impedance of solid cylindrical conductors // Technical report, 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.3865.1284.
7. Knight D. W. An introduction to the art of Solenoid Inductance Calculation With emphasis on radio-frequency applications, 2016.



УДК 004.383.8.032.26

Моделирование особенностей работы мемристивного кроссбар-массива в нейроморфных электронных модулях

Дудкин А. П., Андреева Н. В., Рындин Е. А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)**197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
anddudkin000@gmail.com, nvandr@gmail.com, rynenator@gmail.com*

Разработана модель мемристивного кроссбар-массива, учитывающая падение напряжения на межсоединениях, дискретизацию шага перестройки уровней проводимости и нелинейность характеристик мемристоров. Получены результаты тестирования импульсной нейронной сети с применением разработанной модели.

Ключевые слова: импульсные нейронные сети; мемристивный кроссбар-массив.

Основу современной энергонезависимой оксидной резистивной памяти (OxRAM) составляют мемристивные структуры.

Успешная интеграция OxRAM в нейроморфные системы требует решения задач сопряжения режимов аналоговой перестройки проводимости мемристивных структур с цифровым управлением, задавая необходимость дискретизации уровней проводимости, а также решения проблем, обусловленных вариабельностью параметров и нелинейностью характеристик структур. Поэтому разработка моделей и эффективных средств проектирования мемристивных кроссбар-массивов, учитывающих данные особенности мемристоров, является актуальной и важной задачей. В рамках работы по созданию модели нейроморфного модуля, учитывающего особенности аппаратного исполнения импульсных нейронных сетей (ИНС), были разработаны:

- алгоритм определения программно предобученных весов мемристивного кроссбар-массива с учетом дискретного диапазона состояний проводимости мемристивных элементов;
- математическая модель для расчета падений напряжения на элементах соединений кроссбар-массива;
- комплекс алгоритмов, использующих экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) мемристивных элементов при расчете кроссбар-массива и учитывающих нелинейность ВАХ, дискретность уровней проводимости мемристоров;
- симулятор импульсной нейронной сети, использующий разработанную модель нейроморфного модуля (https://github.com/anddudkin/SNN_memristor_based).

На рис. 1 приведена схема мемристивного кроссбар-массива.

Математическая модель для расчета токов и напряжений в кроссбар-массиве с учетом сопротивлений межсоединений представлена в виде следующей системы уравнений:

$$(2G_{wL} + G_{ij}) \cdot [V_{wL}]_{ij} - G_{wL} \cdot [V_{wL}]_{i,j+1} - G_{ij} \cdot [V_{wL}]_{ij} = G_{wL} \cdot V_i \quad \text{для } j=1,$$

$$\begin{aligned}
 (2G_{WL} + G_{ij}) \cdot [V_{WL}]_{ij} - G_{WL} \cdot [V_{WL}]_{i,j-1} - G_{WL} \cdot [V_{WL}]_{i,j+1} - G_{ij} \cdot [V_{BL}]_{ij} &= 0 \quad \text{для } 1 < j < n, \\
 (G_{WL} + G_{ij}) \cdot [V_{WL}]_{ij} - G_{WL} \cdot [V_{WL}]_{j-1} - G_{ij} \cdot [V_{BL}]_{ij} &= 0 \quad \text{для } j = n, \\
 (G_{BL} + G_{ij}) \cdot [V_{BL}]_{ij} - G_{ij} \cdot [V_{WL}]_{ij} - G_{BL} \cdot [V_{BL}]_{i+1,j} &= 0 \quad \text{для } i = 1, \\
 (2G_{BL} + G_{ij}) \cdot [V_{BL}]_{ij} - G_{ij} \cdot [V_{WL}]_{ij} - G_{BL} \cdot [V_{BL}]_{i-1,j} &= 0 \quad \text{для } 1 < i < m, \\
 (2G_{BL} + G_{ij}) \cdot [V_{BL}]_{ij} - G_{ij} \cdot [V_{WL}]_{ij} - G_{BL} \cdot [V_{BL}]_{i-1,j} &= 0 \quad \text{для } i = m,
 \end{aligned}$$

где G_{ij} , G_{WL} , G_{BL} — проводимости резистивных устройств с индексами i, j , элементов межсоединений строки и столбца соответственно; V_{WL} и V_{BL} — падения напряжения на элементах соединительных линий; n и m — количество строк и столбцов в кроссбар-массиве.

Представленная математическая модель корректна в случае линейных ВАХ элементов кроссбар-массива. Однако, поскольку мемристивные структуры имеют нелинейные вольт-амперные характеристики [1], это необходимо учитывать при разработке нейроморфных модулей.

Для расчета выходных токов на столбцах кроссбар-массива с учетом сопротивления линий и нелинейности ВАХ мемристивных элементов разработан итерационный алгоритм, позволяющий найти решение приведенной выше системы уравнений методом последовательных приближений. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

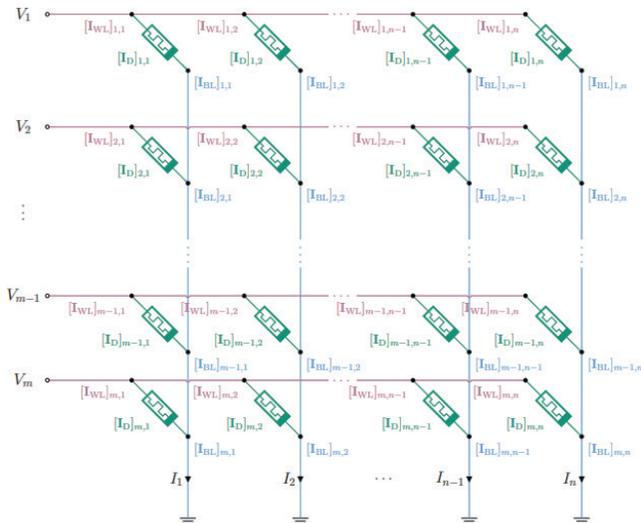


Рис. 1. Схема мемристивного кроссбар-массива

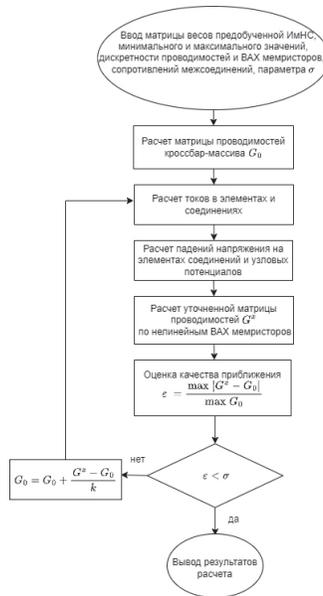


Рис. 2. Блок-схема итерационного алгоритма

Для оценки влияния особенностей аппаратного исполнения проведен ряд экспериментов для ИМНС в инференс-режиме в задаче распознавания изображений [2]. Полученные результаты показывают снижение точности распознавания изображений на 9–11 % в сравнении с результатами, полученными без учета падений напряжения на элементах соединений, дискретности состояний мемристоров и нелинейности их вольт-амперных характеристик, что свидетельствует о необходимости учета данных факторов при проектировании нейроморфных модулей.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2020-0013.

Литература

1. Bouvier Maxence, Valentian Alexandre, Mesquida Thomas, Rummens Francois, Reyboz Marina, Vianello Elisa and Beigne Edith. Spiking Neural Networks Hardware Implementations and Challenges: A Survey. — New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019. Vol. 15. P. 1550–4832.
2. Diehl Peter, Cook Matthew. Unsupervised learning of digit recognition using spike-timing-dependent plasticity // *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2015. Vol. 9: 99. DOI: 10.3389/fncom.2015.00099.

УДК 537.312.7

Обзор современного состояния мемристорных структур на основе GaO₂

Мизгинов Д. С., Тельминов О. А., Горнев Е. С.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

nime@nime.ru

Проанализировано современное состояние мемристоров на основе оксида галлия, проблемы и перспективы развития.

Ключевые слова: мемристор; оксид галлия; кремний; элементная база.

В настоящее время разработка мемристоров на основе оксида галлия на кремниевой подложке является одной из важнейших задач [1]. В частности, разработка таких мемристоров необходима для формирования элементной базы нового поколения на основе мемристоров [2]. Такая элементная база будет иметь ряд существенных преимуществ с точки зрения архитектуры процессоров [3]. В современной фон-неймановской архитектуре процессоров происходит потеря производительности за счет обмена данными между памятью и областью вычислений. В мемристорной элементной базе вычисления будут происходить непосредственно в памяти за счет изменения сопротивления мемристоров, что по сути является изменением синаптических весов в синапсах головного мозга.

На сегодняшний день одними из наиболее актуальных материалов для формирования мемристорных структур являются оксид галлия, нитрид кремния [4]. На рис. 1 изображен мемристор, разработанный в 2019 году на основе оксида галлия [5], в котором было обнаружено снижение напряжения записи под воздействием ультрафиолета за счет того, что фотогенерированные носители и кислородные вакансии снижают потенциальный барьер. Тем не менее остается открытым вопрос увеличения количества циклов переключения и надежности подобных структур. Соответственно, необходимы дальнейшие исследования в этой области. Одним из возможных решений данной проблемы может стать разработка структур с вариацией параметров толщин функционального слоя, материалов электродов, легирование активного слоя дополнительными примесями. В качестве материалов электродов могут быть рассмотрены Pt, TiN, TaN и другие [6].

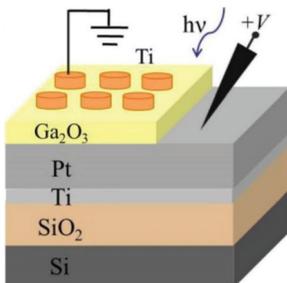


Рис. 1. Схематическое изображение мемристорной структуры на основе оксида галлия на кремниевой подложке [5]

Моделирование механизмов транспорта носителей заряда позволит определить оптимальные параметры для изготовления подобных структур, а проведение измерительных экспериментов в импульсном режиме позволит определить электрические параметры для задания режима работы мемристора, такие как ширина и амплитуда импульса переключения, время нарастания и спада импульса, время задержки между импульсами, обеспечивающие надежность структур [7].

Литература

1. Egorov K. V., Kirtaev R. V., Lebedinskii Y. Y., Orlov O. M. et al. Complementary and bipolar regimes of resistive switching in TiN/HfO₂/TiN stacks grown by atomic-layer deposition // *Physica Status Solidi. A: Applications and Materials Science*, 2015. Vol. 212. № 4. P. 809–816.
2. Strukov D. B. et al. The missing memristor found // *Nature*, 2008. Vol. 453. P. 80–83.
3. Egorov K. V., Lebedinskii Y. Y., Markeev A. M., Orlov O. M. Full ALD Ta₂O₅-based stacks for resistive random access memory grown with in vacuo XPS monitoring // *Applied Surface Science*, 2015. Vol. 356. P. 454–459.
4. Zhu L. et al. An overview of materials issues in resistive random access memory // *J. Materiomics*, 2015. Vol. 1. № 4. P. 285–295.
5. The modification of ultraviolet illumination to resistive switching behaviors in Ga₂O₃ memory device // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, March 2019. Vol. 30. P. 8629–8635.
6. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2002. — С. 413–413.
7. Mehonic A., Kenyon A. J. Resistive Switching in Oxides // *Defects at Oxide Surfaces*. J. Jupille, G. Thornton (Eds.). Cham: Springer, 2015. P. 401–428.



УДК 538.915, 546.26

Исследование резистивного переключения в легированных азотом углеродных нанотрубках

Полывянова М. Р.¹, Соболева О. И.¹, Ильина М. В.², Ильин О. И.¹

¹ Южный федеральный университет,
Научно-исследовательская лаборатория
технологии функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е

² Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е
polyvianova@sfnu.ru

Представлены результаты исследований резистивного переключения в легированных азотом углеродных нанотрубках в зависимости от параметров их роста. Установлено нелинейное изменение отношения сопротивлений HRS/LRS с увеличением аспектного отношения длины к диаметру, температуры роста и концентрации азота.

Ключевые слова: резистивное переключение; N-УНТ; бамбуковые перемычки; пьезоэлектрический эффект; мемристор.

Благодаря ряду преимуществ, таких как простая структура, низкая стоимость и энергопотребление, резистивная оперативная память (RRAM) привлекает большое внимание исследователей [1]. В качестве функциональных материалов для RRAM широко исследуются мемристоры на основе оксидов металлов [2] и органических материалов [3]. Отдельное внимание уделяется углеродным наноматериалам, которые обладают более высокой термостойкостью и большей химической стабильностью. Одним из перспективных углеродных наноматериалов при разработке мемристоров для нейроморфных вычислений являются легированные азотом углеродные нанотрубки (N-УНТ) [4], которые демонстрируют многоуровневое резистивное переключение (РП). Целью данной работы является установление зависимости параметров РП N-УНТ от температуры роста, геометрических параметров, соотношения технологических газов и материалов нижнего электрода.

В качестве исследуемых образцов были использованы массивы N-УНТ, выращенные методом плазмохимического осаждения из газовой фазы в потоках технологических газов ацетилена (C_2H_2) и аммиака (NH_3). В качестве каталитического слоя выступал Ni, а в качестве материалов нижнего электрода использовались TiN, Ti, Mo и Cr. Исследование геометрических параметров массивов N-УНТ осуществлялось методом растровой электронной микроскопии. Исследования РП выполнялись методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). В процессе измерения вольт-амперных характеристик АСМ зонд был заземлен, на нижний электрод подавалось напряжение. При этом N-УНТ испытывали деформацию изгиба, вызванную прижимом зонда АСМ к вершине нанотрубки в процессе измерения.

В ходе исследования было выявлено, что температура роста значительно влияет на РП. С увеличением температуры роста от 500 до 575 отношение HRS/LRS снижается от 22 до 5, что связано с уменьшением дефектности N-УНТ и сокращением



количества «бамбуковых перемычек», которые являются источником пьезоэлектричества в N-УНТ и причиной РП в N-УНТ [5]. Также было установлено, что концентрация азота и геометрические параметры N-УНТ являются ключевыми факторами, влияющими на РП. С увеличением аспектного отношения длины к диаметру N-УНТ от 11 до 45 растет отношение сопротивлений HRS/LRS от 11 до 5549. Это связано с тем, что величина деформации N-УНТ при постоянной силе воздействия возрастает с ростом аспектного отношения нанотрубки, что приводит к увеличению внешнего электрического и внутреннего пьезоэлектрического полей. Увеличение отношения HRS/LRS с ростом концентрации азота связано с увеличением числа бамбуковых «перемычек».

Также было проведено исследование влияния материалов нижнего электрода на величину РП. Максимальное РП ($HRS/LRS = 5434$) наблюдалось для образца, выращенного на нижнем электроде из Mo, что связано с максимальной концентрацией азота пиррольного типа в N-УНТ, выращенных на нижнем электроде из Mo.

Таким образом, было показано влияние различных параметров на РП. Полученные результаты могут быть использованы при разработке мемристоров для нейроморфных вычислений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; государственное задание в области научной деятельности № FENW-2022-0001.

Литература

1. Aziz T. N. T. A. et al. Transparent hybrid ZnO-graphene film for high stability switching behavior of memristor device // Mater. Sci. Semicond. Process, 2019. Vol. 89. P. 68–76.
2. Ryu H., Kim S. Self-Rectifying Resistive Switching and Short-Term Memory Characteristics in Pt/HfO₂/TaOx/TiN Artificial Synaptic Device // Nanomaterials, 2020. Vol. 10. № 11. P. 2159.
3. Sun Y. et al. Nonvolatile memory devices based on poly(vinyl alcohol) + graphene oxide hybrid composites // Phys. Chem., 2016. Vol. 18. № 16. P. 11341–11347.
4. Il'ina M. V. et al. Memristive switching mechanism of vertically aligned carbon nanotubes // Carbon, 2017. Vol. 123. P. 514–524.
5. Il'ina M. V. et al. Memristors based on strained multi-walled carbon nanotubes // Diam. Relat. Mater., 2022. Vol. 123. P. 108858.

УДК 621.382; 004.383.8.032.6; 519.6;

Дизайн матриц нейроморфных устройств для создания нейросетевых архитектур

Писарев А. Д., Николаева Е. А.

Тюменский государственный университет

625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6

evn.72@yandex.ru

В докладе рассмотрены топологии матриц нейроморфных компонентов с программируемыми синаптическими связями на мемристорах. Показано, что в матрицах необходима избыточность электронных узлов для динамического формирования нейросетевых архитектур, реализуемых на платформе биоморфного нейропроцессора.

Ключевые слова: биоморфный нейропроцессор; искусственный интеллект; мемристор; мемристорно-диодный кроссбар; импульсные нейронные сети.

На сегодняшний день в области нейроморфной электроники большой практический интерес представляет дизайн масштабируемых массивов мемристоров. Такие массивы могут найти применение не только в качестве резистивной памяти, но и в аппаратных средствах, предназначенных для реализации больших нейронных сетей, в том числе способных выйти на уровень моделирования сильного искусственного интеллекта (ИИ).

Искусственная система с малым количеством нейроморфных элементов не демонстрирует возможности сильного ИИ, но при этом как слабый ИИ сейчас находит широкое применение в различных народнохозяйственных сферах. Сильный ИИ потенциально может быть использован, что приведет к открытию новых способов познания. По мнению физиологов, для сильного искусственного интеллекта важно количество нейронов. В данном случае можно сформулировать тезис: в искусственных нейронных системах качество определяется количеством узлов сети и при достижении определенного размера искусственной нейронной системы можно получить качественный скачок от слабого к сильному ИИ.

Функциональность нейроморфных устройств в виде мемристорных запоминающей и логической матриц описана в работе [1]. В статье [2] представлены результаты схемотехнического моделирования работы импульсной нейросети на основе электрических схем запоминающей матрицы в режиме сложения взвешенных импульсов, логической матрицы в режиме маршрутизатора импульсов от нейронного блока на синапсы запоминающей матрицы. В [3] представлена концепция автономного аппаратного средства — нейропроцессора сверхбольших массивов электронных нейронов и синаптических связей.

Гипотеза настоящей работы заключается в создании универсального автономного аппаратного средства для любых нейросетевых архитектур, в том числе динамически изменяющихся, с помощью матриц нейроморфных устройств, которые выполняют нейронные функции с программируемыми связями и являются избыточными. В матрицах необходима избыточность электронных узлов для динамического формирования нейросетевых архитектур, реализуемых на платформе биоморфного нейропроцессора. Избыточность электронных узлов в нейропроцессоре необходима для гибкого формирования нейросетевых архитектур. Избыточность



предоставляет возможность формирования потенциальных узлов искусственной нейросети аналогично биологическим процессам образования и гибели нейронов.

Резюмируя, важно отметить, что для создания сильного искусственного интеллекта требуются миниатюрные устройства, совмещающие в себе запоминающие и базовые математические операции. На эту роль подходят мемристоры, стоимость формирования которых в интегральном виде по разработанным технологическим маршрутам на основе вакуумного магнетронного распыления низка по сравнению с площадью транзисторного кристалла, где для его создания используется много сложных технологических операций. Этот факт обуславливает использование понятия «избыточность» по отношению к нейроморфным электронным схемам.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030» и Центра природовдохновленного инжиниринга Тюменского государственного университета.

Литература

1. Pisarev A. D., Busygin A. N., Bobylev A. N., Udovichenko S. Yu. High element integration in logical and memory matrices of neuroprocessor by applying composite memristor-diode crossbar // International Journal of Nanotechnology, 2019. Vol. 16. № 1/2/3. P. 182–186. DOI: 10.1504/IJNT.2019.102404.
2. Udovichenko S. Yu., Pisarev A. D., Busygin A. N., Ebrahim A. H., Bobylev A. N., Gubin A. A. Modeling of processes of information processing in biomorphic neuroprocessor // OBM Neurobiology, 2022. Vol. 6. Special Issue № 3: Neuroscience and Information Technology. P. 1–15. DOI: 10.21926/obm.neurobiol.2203134.
3. Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Yu., Maevsky O. V. The biomorphic neuroprocessor based on the composite memristor — diode crossbar // Microelectronic journal, 2020. 104827. DOI: 10.1016/j.mejo.2020. Art.104827.

УДК 621.382

Проектирование LIF-нейрона на основе обучаемых наноматериалов и компонентов твердотельной электроники

Боровинский В. К., Писарев А. Д.

Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
spcb.doc@gmail.com

В докладе представлены результаты проектирования LIF-нейрона с использованием процесса формирования проводящего филамента в металлооксидном мемристоре. Функция интегрирования импульсов напряжения реализована за счет латентного изменения длины филамента в мемристивном материале.

Ключевые слова: нейропроцессор; LIF-нейрон; мемристорно-диодный кроссбар; мемристор; филамент; LIF-нейрон.

Известные схемотехнические модели LIF-нейронов (Leaky Integrate-and-Fire) [1] не являются эффективными с точки зрения построения на их основе больших нейронных массивов, которые требуются для создания нейропроцессора. В настоящей работе рассматриваются варианты применения процесса роста филамента в металлооксидном мемристоре для моделирования скрытого параметра состояния LIF-нейрона. Такой подход является заменой электрического конденсатора в функции интегрирования LIF-нейрона и может быть реализован на основе мемристорно-диодного кроссбара [2] для формирования блоков больших массивов LIF-нейронов, комбинированных с компонентами твердотельной электроники.

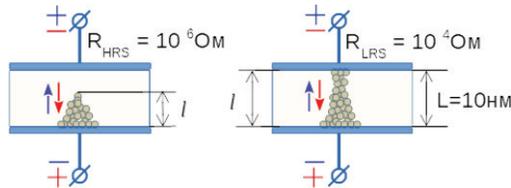


Рис. 1. Процесс роста филамента при подаче электрических импульсов

Срабатывание (Fire) LIF-нейрона основано на ключевом переключении электрического сопротивления мемристора, которое возникает на пороге перколяции проводящего канала в филаменте. На рис. 1 показано формирование филамента до порога перколяции и после. Рост филамента происходит за счет подачи положительного электрического импульса на мемристор, который модифицирует непроводящий оксид металла в проводящий металлический канал за счет движения ионов кислорода в сильном электрическом поле и формирования кислородных вакансий в объеме оксида. В момент срабатывания происходит замыкание проводящих слоев и резкий скачок сопротивления мемристора. В зависимости от полярности электрического импульса филамент может либо расти, либо уменьшаться в размерах, и этот процесс эквивалентен функции интегрирования (Integrate). За утечку (Leak) отвечает эффект «забывания» (диффузионный мемристор) [3], наблюдаемый в мемристорах, характеризуемый временем удержания малого резистивного



состояния τ_{LRS} , либо сброс состояния R_{LRS} путем подачи электрического импульса от внешней схемы.

В рамках настоящей работы с помощью рассмотренных схемотехнических решений с использованием скрытого параметра (длины филамента) и резистивного поведения мемристора в разработанной схеме LIF-нейрона промоделирован физиологический процесс формирования нейронной синаптической связи. Предложенное схемотехническое решение показывает, что можно увеличивать проводимость оставшихся мемристорных синапсов при обнаружении поврежденного, имитируя работу астроцита [4], что обеспечит возможность самовосстановления аппаратного устройства и значительно снизит требование к надежности мемристоров по аналогии с принципом защиты поврежденных нейронных связей в биологических системах. Таким образом, предложенную в статье [1] электрическую схему LIF-нейрона можно улучшить, заменив электрический конденсатор на мемристор и добавив помимо связок синапс — нейрон еще и третий объект, обеспечивающий обратную связь для защиты синапсов нейронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030» и Центра природовдохновленного инжиниринга Тюменского государственного университета.

Литература

1. Junxiu Liu, Yongchuang Huang, Yuling Luo, Harkin J., McDaid L. Bio-inspired fault detection circuits based on synapse and spiking neuron models // *Neurocomputing*, 2019. 331: 473–482. DOI: 10.1016/j.neucom.2018.11.078.
2. Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Y., Maevsky O. V. A biomorphic neuro-processor based on a composite memristor-diode crossbar // *Microelectronics Journal*, 2020. 104827. DOI: 10.1016/j.mejo.2020.104827.
3. Wang Z., Joshi S., Savel'ev S. et al. Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing // *Nature Mater*, 2017. 16, 101–108. DOI: 10.1038/nmat4756.
4. Junxiu Liu, Harkin J., Maguire L. P., McDaid L. J., Wade J. J. SPANNER: A Self-Repairing Spiking Neural Network Hardware Architecture // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2017. 29 (4): 1287–1300. DOI: 10.1109/TNNLS.2017.2673021.

УДК 621.382; 004.383.8.032.6; 519.6;

Разработка аппаратной импульсной нейронной сети

Писарев П. А., Писарев А. Д.

Тюменский государственный университет

625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6

spcb.doc@gmail.com

Исследование относится к области создания искусственного интеллекта путем разработки аппаратных средств для реализации больших импульсных нейронных сетей. Рассмотрен механизм синаптического взвешивания и процесс формирования информационных импульсов на уровне современной нейробиологической модели.

Ключевые слова: биоморфный нейропроцессор; искусственный интеллект; мемристор; мемристорно-диодный кроссбар; импульсные нейронные сети.

В настоящее время развиваются два фундаментально разных подхода к моделированию нейронных сетей: информационный и биологический. В информационном подходе используется модель формального нейрона в составе перцептрона [1]. Уровень упрощения процесса обработки информации по сравнению с биологическими нейронными системами слишком высок. Сложные биологические функции нейрона, определяющие пространственно-временные характеристики импульсных нейросигналов в его частях: дендрите, соме и аксоне, заменены на три последовательно выполняемые математические операции с числовыми данными: взвешивание уровня сигнала, суммирование взвешенных сигналов и активация суммы с помощью ступенчатой функции. Напротив, крайне сложна полная нейробиологическая модель нейрона Hodgkin, Huxley [2], в которой только изменение потенциала во времени на мембране нейрона описывается пятью дифференциальными уравнениями с тридцатью одним параметром. Вместе с тем биологический подход является более подходящим для воплощения в автономном аппаратном средстве, содержащем функционально похожие элементы на биологические нейроны.

На основе упрощенной системы уравнений [3], описывающей изменения потенциала во времени на мембране нейрона, в рамках настоящей работы выполнен анализ алгоритма прохождения информационного сигнала через биологический нейрон.

Механизм синаптического взвешивания сигнала между аксоном нейрона источника и дендритом нейрона приемника достаточно сложный. Этот процесс представлен на рис. 1 в виде блок-схемы алгоритма расчета параметров. Под действием импульсов в аксоне накапливается электрический потенциал (формируется кальциевый микродомен в аксонной терминали), что вызывает выброс молекул нейромедиатора в межсинаптическую щель.

Гипотеза данной работы заключается в том, что для создания сверхбольшой аппаратной импульсной нейросети необходимо построить физико-математическую модель нейрона, максимально упрощенную с точки зрения времени расчета, но без потери точности выполнения биологических функций, служащих для обработки информации. Этого можно достичь путем замены численного решения дифференциальных уравнений и алгоритмов, описывающих изменение потенциала на мембране нейрона, на явные передаточные функции подходящих электронных



компонентов. В качестве аппаратной основы для реализации биологически подобной нейросети будет использоваться мемристорно-диодный кроссбар — новый компонент наноэлектроники, разработанный для создания нейроморфных систем, на основе которого предложена концепция биоморфного нейропроцессора [5].

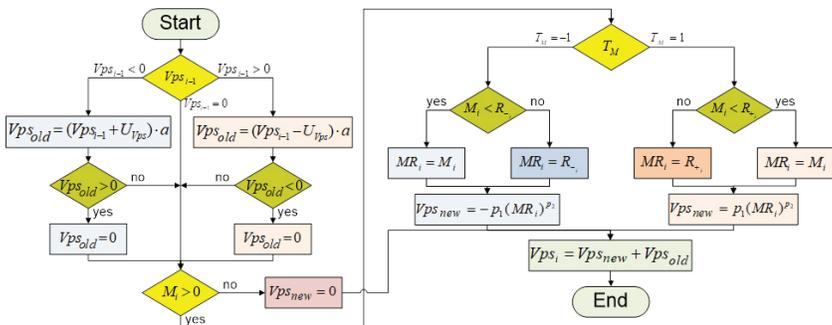


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета постсинаптического потенциала на мембране биологического нейрона [4]

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030» и Центра природовдохновленного инжиниринга Тюменского государственного университета.

Литература

1. Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain // Psychol. Rev., 1958. 65: 386–408. DOI: 10.1037/h0042519.
2. Hodgkin A. L., Huxley A. F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // Journal of Physiology, 1952. 117 (4): 500–544.
3. Malebra P., Rulkov N. F., Bazhenov M. Large time step discrete-time modeling of sharp wave activity in hippocampal area CA3 // Commun. Nonlinear. Sci. Numer. Simulat., 2019. 72: 162–175. DOI: 10.1016/j.cnsns.2018.12.009.
4. Filippov V. A., Bobylev A. N., Busygin A. N., Pisarev A. D., Udovichenko S. Yu. A bi-morphic neuron model and principles of designing a neural network with memristor synapses for a biomorphic neuroprocessor // Neural Computing and Applications, 2020. 32. P. 2471–2485.
5. Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Yu., Maevsky O. V. The biomorphic neuroprocessor based on the composite memristor — diode crossbar // Microelectronic journal, 2020. 104827. DOI:10.1016/j.mejo.2020. Art.104827.

УДК 004.032.26, 621.373.1.

Модель нейроморфного спайкового генератора на основе мемристовых наноразмерных устройств

Кипелкин И. М.

ННГУ им. Н. И. Лобачевского,

лаборатория стохастических мультистабильных систем

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

Ivan.kipelkin@yandex.ru

В работе исследуется мемристовая нейроморфная система. Благодаря внутренней адаптивности мемристов было обнаружено, что встречно-параллельное подключение таких устройств способно имитировать работу ионных каналов нейрона и качественно воспроизводить основные характеристики нейрональной спайковой активности.

Ключевые слова: мемристор; ионный канал; нейрон; спайковая активность; нейроморфная система.

В последние годы в научных исследованиях активно исследуется возможность замены транзисторной технологии устройствами энергонезависимой памяти на основе эффекта резистивного переключения. Примером таких устройств можно считать мемристор — микроэлектронную двухполюсную структуру «металл — диэлектрик — металл» [1]. Исследования показали, что такого типа мемристор обладает свойством адаптивности [2]. Благодаря этому данное устройство является идеальным компонентом осцилляторных схем при имитации ионных каналов нейрона. Такие схемы разрабатываются как в упрощенном варианте, учитывающем исключительно кинетику одного канала [3, 4], так и в усложненном, представляющем модификацию модели Ходжкина — Хаксли [5]. Однако данные устройства обладают высокой степенью стохастичности, что требует проведения комплексного исследования для точного управления системы в целом.

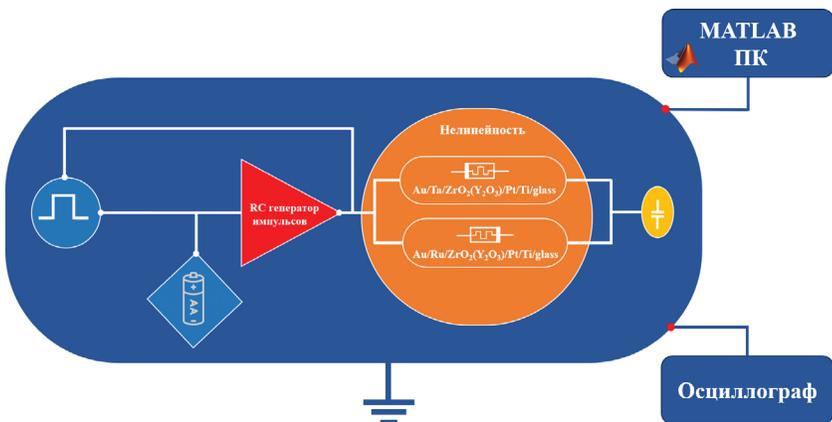


Рис. 1. Блок-схема мемристовой нейроморфной системы

Мемристивная нейроморфная система представляет из себя радиотехнический макетный образец, состоящий из ряда блоков и электронных компонентов (рис. 1). Конструктивной особенностью данного макета является использование встречно-параллельного подключения мемристивных устройств в блоке нелинейности, отвечающем за генерацию сигналов и имитацию ионных каналов, как и в живых нейронах. Благодаря этому данная система способна демонстрировать основные характеристики нейрональной спайковой активности, включая автоколебания, возбуждение, бистабильность, а также пачечную активность.

Разработка таких систем открывает путь к современным и инновационным методам медицинского лечения травм спинного мозга, включающим в себя использование подкожных гибридных имплантов, основанных на нейрореабилитационном подходе и способных к самоадаптации и компенсации индивидуальных особенностей каждого конкретного медицинского случая.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах».

Литература

1. Chua L. Memristor-the missing circuit element // IEEE Transactions on circuit theory, 1971. Vol. 18. № 5. P. 507–519.
2. Yang F., Xu Y., Ma J. A memristive neuron and its adaptability to external electric field // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2023. Vol. 33. № 2.
3. Najem J. S. et al. Memristive ion channel-doped biomembranes as synaptic mimics // ACS nano, 2018. Vol. 12. № 5. P. 4702–4711.
4. Gonzalez-Raya T., Solano E., Sanz M. Quantized three-ion-channel neuron model for neural action potentials // Quantum, 2020. Vol. 4. P. 224.
5. Hu X., Liu C. Dynamic property analysis and circuit implementation of simplified memristive Hodgkin–Huxley neuron model // Nonlinear Dynamics, 2019. Vol. 97. P. 1721–1733.



УДК 004.048

Исследование свойств латентного пространства модели автоэнкодера для детектирования аномалий в отклике транзисторов

Чернова А. С.^{1,2}, Мещанинов Ф. П.¹, Жевненко Д. А.¹

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
achernova@niime.ru

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Предложен метод обнаружения аномальных вольт-амперных характеристик транзисторов на основе использования различных вариантов автоэнкодеров и энкодеров. Наряду с пороговой ошибкой восстановления рассматриваются скрытые представления при принятии решения об аномальности данных.

Ключевые слова: электроника; отказы; вольт-амперная характеристика; машинное обучение.

На этапе тестирования электронных устройств осуществляется контроль электрофизических параметров, включающий в себя процесс снятия вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзисторов в различных режимах функционирования [1]. Для анализа электронных устройств применяется специализированное программное обеспечение, содержащее в себе алгоритмы определения аномальности данных. Традиционные методы основываются на предварительно заданных пороговых значениях характеристик транзистора, требующих значительного объема статистических данных. Однако при разработке новых устройств такие пороговые значения зачастую не определены, а большие наборы данных недоступны. Методы на основе машинного обучения для детектирования аномалий, как правило, используют пороговое значение ошибки восстановления [2].

Предлагаемый подход обнаружения аномальных ВАХ транзисторов основан на использовании нейронных сетей в качестве инструмента для обнаружения аномалий. Применяемые нейросетевые модели представляют собой различные модели автоэнкодеров и энкодеров. Исходные данные кодируются энкодером в латентное пространство меньшей размерности, после чего в зависимости от архитектуры модели скрытые состояния с последнего слоя энкодера подаются на вход классификатору либо декодеру. Классификатор распределяет низкоразмерные векторные представления характеристик на классы. Двумерные представления можно визуализировать на графике, где по осям отложены координаты характеристики в латентном пространстве. На графике аномальные точки обозначены красным цветом. Точки без аномалий группируются вместе вдоль диагонали. Аномальные точки располагаются в стороне от диагонали. Дальнейшие исследования предполагают изучение подходов к формированию латентных пространств с более четкой структурой классов. Декодер восстанавливает характеристики до исходной размерности с некоторой ошибкой восстановления. В силу своей природы аномальные данные восстанавливаются с большей ошибкой восстановления [3]. Следовательно,

путем подбора порогового значения ошибки восстановления можно отделять аномальные точки данных от точек без аномалий.

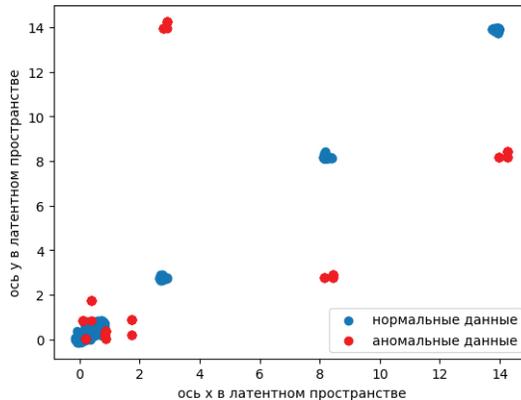


Рис. 1. Представления характеристик в латентном двумерном пространстве.

Представление получено с помощью модели трехслойного полносвязного автоэнкодера, на вход которой подаются точки характеристики

Основной смысл данной работы заключается в изучении скрытых представлений, полученных нейросетевыми моделями в процессе обучения на данных без аномалий, наряду с пороговой ошибкой восстановления при принятии решения об аномальности данных. Эффективность предложенного подхода обнаружения аномалий была подтверждена в ходе валидации на 140 ВАХ с экспериментальными данными транзисторов. Данный подход к обнаружению аномалий ВАХ транзисторов может быть обобщен без фундаментальных изменений на другие прикладные задачи, например поиск аномалий во временных рядах.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. Geiger A., Liu D., Alnegheimish S. et al. Tadgean: Time series anomaly detection using generative adversarial networks // 2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 2020. P. 33–43.
3. Cheng Z. et al. Improved autoencoder for unsupervised anomaly detection // International Journal of Intelligent Systems, 2021. Vol. 36. № 12. P. 7103–7125.



УДК 004.891.3

Разработка нейронной сети для системы поддержания работоспособности водителя на основе компьютерного зрения

Быканова У. Ф., Сметанин И. А., Сметанин Е. А., Асоян А. Р., д. т. н.
*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
bikanova.ulyana@yandex.ru*

Система основана на анализе видеоряда с использованием компьютерного зрения. Она отслеживает мимику, позу, движения глаз водителя, оценивает его усталость и стресс. По результатам анализа система выдает своевременные предупреждения водителю в виде звуковых сигналов и уведомлений на приборной панели.

Ключевые слова: компьютерное зрение; машинное обучение; помощь водителю; безопасность дорожного движения; нейронные сети.

Повышение безопасности на дорогах — одна из важнейших задач современного мира. Усталость, невнимательность и стресс водителей часто становятся причинами аварий. Для решения этой проблемы активно разрабатываются системы, которые помогают водителям оставаться бодрыми и внимательными за рулем.

Одной из самых перспективных технологий в этой области является разработка систем на основе компьютерного зрения. Такие системы используют камеры, установленные в салоне автомобиля, чтобы анализировать поведение водителя в реальном времени.

С камеры в нейронную сеть подается видеоряд в режиме реального времени. Далее происходит предобработка данных и распознавание первичных признаков усталости по изменениям мимики водителя, положения его головы, частоты и длительности моргания глаз. При обнаружении признаков усталости или невнимательности программой подается предупреждающий звуковой сигнал для привлечения внимания водителя и сообщения на приборной панели или проекционном дисплее. В перспективе возможно подключение дополнительных функций, например световых сигналов или автоматического торможения.

Преимуществами данной разработки являются повышение безопасности, улучшение комфорта и снижение количества аварий. Разработка является инновационной, так как используются гибридные нейронные сети для получения более точных данных.

В перспективе возможно совершенствование алгоритмов компьютерного зрения, чтобы повысить точность и надежность систем. Также системы поддержания работоспособности водителя могут быть интегрированы с другими системами безопасности автомобиля, например с системой автоматического торможения или адаптивным круиз-контролем. В будущем система может даже помочь водителю выбрать оптимальный маршрут с учетом его физического и эмоционального состояния.

Разработка систем поддержания работоспособности водителя на основе компьютерного зрения — это одно из ключевых направлений в сфере безопасности дорожного движения. Эта технология имеет большой потенциал для спасения жизней и повышения комфорта вождения.



Литература

1. Володин А. А. и др. Интеллектуальная система контроля бдительности и действий машиниста // Бюллетень результатов научных исследований, 2024. — № 2. — С. 86–99.
2. Кириллова Е. С., Сериков С. А. Методы и средства контроля состояния водителя автомобиля // Международный журнал гуманитарных и естественных наук, 2024. — № 3-2 (90). — С. 169–172.
3. Макаев Д. В., Иванов И. И., Юров А. П. Система мониторинга состояния водителя как составная часть интеллектуальной системы управления транспортным потоком // Информационные технологии и инновации на транспорте, 2021. — С. 235–243.

УДК 004.056.55

Применение нейроморфных систем для решения задачи трекинга

Передерин И. Д., Евсиков В. А.*Национальный исследовательский университет**«Высшая школа экономики»**101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20**idperederin@edu.hse.ru*

Проанализированы основные алгоритмы глубинного обучения для решения задачи трекинга. Описаны некоторые нейроморфные алгоритмы, нейропроцессоры и событийные камеры, используемые для более эффективного трекинга. Произведено сравнение качественных и количественных характеристик этих устройств.

Ключевые слова: нейроморфные системы; глубинное обучение; трекинг объектов; нейропроцессоры; компьютерное зрение.

На сегодняшний день искусственные нейронные сети получают свое активное развитие в разных областях, в частности в задачах компьютерного зрения. Одной из задач компьютерного зрения является трекинг объекта на видеоизображении. Глубинное обучение, в частности алгоритмы, использующие сверточные нейронные сети, позволяют успешно решать эту задачу, однако у них есть ограничения по использованию: например, некоторые алгоритмы требуют ручной идентификации объекта трекинга. Некоторые из наиболее эффективных по качественным характеристикам алгоритмов включают:

- YOLO;
- FairMOT;
- Predator.

Эти алгоритмы используются на фон-неймановских компьютерах, и из-за необходимости проведения большого количества операций типа «обращение — получение» использование этих алгоритмов приводит к высокому энергопотреблению, увеличивающемуся с количеством объектов трекинга и размером изображения. Были разработаны нейроморфные алгоритмы, представляющие одну из компонент нейроморфной системы, имитирующие нейробиологические процессы зрения человека. Это позволяет повысить устойчивость системы к шумам на изображении, увеличить скорость работы и повысить количество объектов трекинга без потери точности. Нейроморфные алгоритмы трекинга успешно протестированы на задаче детектирования прохожих [1].

Другим компонентом нейроморфной системы является вычислительное устройство, на котором проводятся вычисления. Для ускорения вычислений в искусственных нейронных сетях и для снижения их энергопотребления были разработаны вычислительные устройства — нейропроцессоры. Их структура отличается от классических процессоров: сеть большинства их них состоит из соединенных между собой вычислительных блоков, имитирующих нейроны, у каждого из них свой блок памяти. Подчеркнем, что каждый нейрон потребляет энергию только в момент прохождения сигнала через него. Новый сигнал будет проходить лишь через определенный «путь», а не через всю сеть. То есть нет необходимости в питании



всей платы на этап[] использования нейропроцессора. Этот принцип был заимствован из импульсных нейронных сетей и позволяет в тысячи раз снизить энергопотребление. Некоторые из нейропроцессоров, успешно протестированных для задач компьютерного зрения:

- TrueNorth;
- Intel Loihi;
- Алтай;
- DynapCNN.

Можно также выделить третью компоненту нейроморфной системы: тип устройства захвата видеоизображения. Наиболее распространенными устройствами являются видеокamеры, представляющие изображения в виде множества пикселей. Такие устройства позволяют выделять «детали» на изображении, но обработка таких изображений является ресурсоемкой задачей. Если нет необходимости трекинга объекта, схожего с другими на изображении, можно использовать событийные камеры — они передают «локальные» изменения на уровне пикселей (эти изменения называются событиями), вызванными движением объекта на кадре. Таким образом, передается динамика изображения, при этом с гораздо более низкими затратами по памяти.

Нейроморфные системы потребляют значительно меньше электроэнергии, могут работать в аналоговом режиме, ускоряя процесс трекинга, что делает их применимыми в системах контроля сверхбыстрых промышленных процессов, системах контроля ситуационной обстановки, беспилотных транспортных средствах и многих других отраслях.

Литература

1. Miao F., Papageorgio C. S. and Itti L. Neuromorphic algorithms for computer vision and attention // Proc. SPIE 4479, Applications and Science of Neural Networks, Fuzzy System. and Evolutionary Computation IV, (14 November 2001). URL: <https://doi.org/10.1117/12.448343>.
2. Kang J., Tariq S., Oh S., Woo S. A Survey of Deep Learning-Based Object Detection Methods and Datasets for Overhead Imagery // IEEE Access, 2022. 10. 1–1. 10.1109/ACCESS.2022.3149052.
3. Subramaniam A. A neuromorphic approach to image processing and machine vision // 2017 Fourth International Conference on Image Information Processing (ICIIP), Shimla, India, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICIIP.2017.8313686.



УДК 004.056.2

Применение режима безопасных вычислений платформы «Эльбрус» в технологиях машинного обучения

Марченко И. В., Титов Е. М., Ярапов Д. В.

АО «МЦСТ»

117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

iri3500@yandex.ru

Проанализированы пакеты поддержки алгоритмов машинного обучения, написанные на небезопасных с точки зрения работы с памятью языках программирования. Рассмотрены особенности процесса портирования в режим безопасных вычислений АПП «Эльбрус».

Ключевые слова: аппаратно-программная платформа «Эльбрус»; режим безопасных вычислений; машинное обучение; язык С.

Режим безопасных вычислений — режим исполнения программ на аппаратно-программной платформе «Эльбрус», обеспечивающий защиту от атак, использующих нарушение безопасности памяти, на аппаратном уровне. Таким атакам подвержены программы, имеющие исходный код на небезопасных с точки зрения работы с памятью языках программирования, таких как С и С++. Для обеспечения функционирования программы в режиме безопасных вычислений ее необходимо портировать в режим безопасных вычислений [1].

Существуют библиотеки, используемые в технологиях машинного обучения, написанные на языках программирования С и С++. Рассмотрены особенности портирования библиотек, используемых в машинном обучении, в режим безопасных вычислений.

Портированы соответствующие библиотекам пакеты поддержки алгоритмов машинного обучения, входящие в состав дистрибутива ОС Linux. Данные пакеты вошли в состав безопасного системного окружения, которое представляет собой изолированное системное окружение, предназначенное для работы с режимом безопасных вычислений на аппаратно-программной платформе «Эльбрус».

Литература

1. Артемьев И. А. и др. Сравнительный анализ технологий безопасного использования памяти с учетом аппаратно-программных особенностей вычислительных комплексов // Цифровые технологии и решения в сфере транспорта и образования, 2023. — С. 11–20.

УДК 004.89

Использование LLM при проектировании РЭА и ЭВМ

Зинченко Л. А., д. т. н., Казаков В. В., к. т. н., Терехов В. В., к. т. н.,
Карышев Б. В., Дорофеев А. В.

МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

nutizma96@gmail.com

Разработана система поиска и агрегации информации из документации на электронные компоненты на основе больших языковых моделей (LLM). Проведено исследование качества работы системы на основе LLM GigaChat.

Ключевые слова: когнитивные технологии; языковые модели; LLM; электроника.

В настоящее время электроника стала неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. Она используется практически во всех сферах деятельности человека, начиная от обычных офисных задач и заканчивая сложными научными исследованиями.

Производство электроники состоит из множества этапов. Практически на каждом из них возникает проблема поиска и анализа информации. Конструкторы вынуждены проводить значительное время за поиском, что увеличивает время разработки нового устройства и снижает качество итогового устройства.

В рамках данной работы предлагается метод решения этой проблемы, заключающийся в применении больших языковых моделей [1] для подбора релевантных документов и генерации ответов, что позволяет генерировать легко воспринимаемые ответы. Был разработан программный комплекс, реализующий предложенную методику, на основе которого была протестирована ее работоспособность. Сервис был создан на основе отечественной языковой модели GigaChat [2]. Для ранжирования документов был применен подход, в основе которого лежат векторные представления [3], для чего использовалась модель e5 [4].

В целом процесс генерации выглядит следующим образом: в систему выгружаются документы. Они разбиваются на блоки и преобразуются в вектора моделью e5. Текстовый запрос пользователя также преобразуется в вектор моделью e5. Происходит ранжирование блоков на основе косинусной близости векторов запроса и блока. Релевантные блоки подаются на вход LLM вместе с запросом пользователя, прошлыми запросами и ответами, а также некоторым базовым промптом, описывающим задачу для LLM, далее происходит генерация ответа и возвращение его пользователю.

Методика заключалась в экспертной оценке авторами результатов работы созданной системы по трехзначной шкале и выставлении соответствующих им численных оценок: плохо (0), удовлетворительно (0.5), хорошо (1). Приведены средние результаты полученных оценок после генерации ответов на основе различного количества документов (табл. 1).



Таблица 1. Средние значения полученных оценок

	Фактическая корректность	Понятность	Краткость	Полнота
Один документ	0,56	1	0,94	0,76
Три документа	0,36	1	0,89	0,93

Исходный код разработанного сервиса является открытым программным обеспечением (Open Source) и был опубликован посредством сервиса GitHub по адресу: https://github.com/BorisKaryshev/LLM_in_doc_search.

По полученным оценкам (табл. 1) можно сделать вывод, что созданный сервис с задачей обобщения информации по тексту справляется. Все ответы грамматически верны и легко понимаются человеком. Однако система плохо отвечает на запросы общего характера, не содержащие упоминания названия компонента. Также иногда ввиду вероятностных особенностей генеративных моделей «путает» параметры (галлюцинирует). В случаях когда задаются общие вопросы, содержащие название компонента, такие как «в чем разница...» или «опиши...», система склонна генерировать чрезмерно много текста со слабой информационной нагрузкой,

Преимущество разработанного сервиса заключается в возможности получить готовый ответ на вопрос без необходимости проводить ручной поиск. Особенно эффективно он справляется с задачей поиска конкретного параметра у конкретного электронного компонента. Появляется возможность экономить время специалиста, что повышает эффективность производства электронной аппаратуры, ускоряет и удешевляет производственный цикл.

Литература

1. Федоров В. О., Поляков Р. А. Большие языковые модели с поисковой расширенной генерацией: обзор и перспективы // Оригинальные исследования, 2023. — Т. 13. — № 12. — С. 43–47.
2. Русскоязычная нейросеть от Сбера. — URL: <https://developers.sber.ru/portal/products/gigachat> (дата обращения: 14.04.2024).
3. Wang L. et al. Text Embeddings by Weakly-Supervised Contrastive Pre-training. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2212.03533> (дата обращения: 14.04.2024).
4. Conneau A. et al. Unsupervised Cross-lingual Representation Learning at Scale. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/1911.02116> (дата обращения: 14.04.2024).



УДК 004.31

Перспективы развития рынка чипов в Российской Федерации

Батманова А. Н.

ООО «Группа компаний «Иннотех»»

123112, г. Москва, Пресненская наб., 12, пом. 9/60

batmanova.uni@yandex.ru

Выделены наиболее актуальные архитектуры чипов, выдвинуты предположения о том, как будет развиваться производство чипов в РФ.

Ключевые слова: чипы; дефицит чипов; чиплеты; нейроморфные вычисления; искусственный интеллект; микроэлектроника; рынок полупроводников.

Ограниченный круг производителей, хрупкость цепочек поставок, отставание от закона Мура — все указывает, что оборудование может стать основным тормозом развития ИИ [1].

Есть два пути преодоления технических ограничений.

1. Гонка за количеством транзисторов.

В 2024 году в списке прорывных технологий года от MIT оказались чиплеты [2]. Это инновационная технология, которая объединяет чиплеты, создающиеся независимо друг от друга, в один процессор. Одно из главных преимуществ — гибкость создания конфигураций.

2. Создание принципиально новой архитектуры.

Нейроморфные вычисления черпают вдохновение в концепции мозга для создания энергоэффективных вычислительных систем. В августе 2022 г. был представлен нейроморфный чип NeuRRAM [3], созданный для функционирования в аналоговом режиме в целях повышения энергоэффективности. Ячейка памяти NeuRRAM может хранить несколько значений в непрерывном диапазоне, в отличие от двоичных ячеек. Это первый чип для вычислений в памяти, который использует небольшой процент от энергии, потребляемой аналогичными платформами, сохраняя эквивалентную точность. В нем имеются элементы, которые копируют работу нейронов и связей между ними (синапсов), что приближает ИИ к работе на огромном спектре периферийных устройств, отключенных от интернета и облачных вычислений, что означает, что устройства могут выполнять сложные вычислительные задачи в любом месте в любое время. Так как выполнение задач в таком процессоре асинхронное и не требует тактовой частоты, энергоэффективность таких процессоров повышается в еще большей степени.

Очевидны риски, которые связаны с географическим сосредоточением основного производства всех видов чипов на Западе: хрупкость поставок, возможность подрыва поставок со злым умыслом, геополитика.

Упрощенный порядок ввоза электроники в РФ продолжит действовать до конца 2024 года [4]. Минпромторг выделяет миллиарды субсидий на импортозамещение микроэлектроники и надеется на создание полностью отечественных чипов 65 нм к 2030 г. [5]

На текущий момент в мире нет страны, которая производит все оборудование для микроэлектроники. Транспортировка оборудования — отдельный дорогостоящий процесс. Некоторые эксперты высказывают опасения, что в случае запуска в России завода печати микросхем нужно будет значительно расширять рынок сбыта, потому что завод должен функционировать 24/7 вне зависимости

от потребности. Остановка мощностей сопровождается сложностями по восстановлению работоспособности. Однако, по прогнозам аналитиков «Яков и Партнеры», совокупный спрос на чипы в России в 2030–2035 г. может превысить отметку 100–150 тыс. пластин ежемесячно. При этом производительность некоторых производственных узлов TSMC еще в 2023 составляла всего лишь 45 тысяч пластин в месяц. Вероятность того, что, даже если в РФ и появится свой завод печати микросхем, полностью спрос он не покроет, достаточно велика.

Учитывая, что уже в 2024 году объем инвестиций в отрасль составил половину от определенного аналитиками «Яков и Партнеры» (400–500 млрд для суверенности отрасли) [6], рано или поздно появятся полностью отечественные чипы. Оптимальным выглядит вариант, когда менее сложные в производстве чипы будут производиться исключительно на российских заводах с российскими компонентами, а созданные по самым передовым технологиям чипы будут закупаться у мировых лидеров отрасли. Создать лучшие чипы силами одной страны, когда конкурентом является весь мир, кажется маловероятным. Помимо этого, можно рассмотреть создание альтернативных чипов для использования производственных мощностей. Например, микрофлюидных чипов — чипов с сетью микроканалов, отлитых внутри чипа. Каналы соединяются для перекачки или контроля биохимической среды. Реакции проходят в закрытой системе чипа, где исключено смешивание, а объемы веществ минимальные. Вне медицины эти чипы могут использоваться в качестве охлаждающей системы в микросхемах [7].

Литература

1. Does AI have a hardware problem? // Nat Electron 1, 205 (2018). URL: <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0068-2>.
2. 10 Breakthrough Technologies 2024 — MIT technology Review. URL: <https://www.technologyreview.com/2024/01/08/1085094/10-breakthrough-technologies-2024/> (дата обращения: 09.07.2024).
3. Wan W., Kubendran R., Schaefer C. et al. A compute-in-memory chip based on resistive random-access memory // Nature 608, 504–512 (2022). URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04992-8>.
4. О внесении изменения в Постановление Правительства Российской Федерации от 9 мая 2022 г. № 834: Постановление Правительства от 29 декабря 2023 г. № 2388 // Официальный сайт Правительства РФ. — URL: <http://government.ru/docs/50585> (дата обращения: 09.07.2024).
5. Об утверждении Правил предоставления субсидии из федерального бюджета некоммерческой организации «Фонд развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий» в целях поддержки и развития малых и средних дизайн-центров электроники: Постановление Правительства от 13 октября 2022 г. № 1827 // Официальный сайт Правительства РФ. — URL: <http://government.ru/docs/46872> (дата обращения: 09.07.2024).
6. Микроэлектроника России. От дефицита к технологической независимости — ООО «Яков и партнеры»: официальный сайт. — URL: https://www.yakov.partners/upload/iblock/f25/1k51y2orhij0b1f89ivy1rbe801dsd1m/microelectronics_in_russia.pdf (дата обращения: 09.07.2024).
7. van Erp R., Soleimanzadeh R., Nela L. et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling // Nature 585, 211–216 (2020). URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2666-1>.



УДК 65.011.56

Математическое моделирование для оценки инвестиционной эффективности при разработке сложной бортовой аппаратуры

Кузнецова Е. С.^{1,2}, Пепеляева А. И.^{1,2}, Иванченко С. А.^{1,2}, Терешкович В. Н.¹,
Бобриков Д. А.¹

¹АО «НИИ «Субмикрон»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2

e.s.kuznetsova@inbox.ru

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе оценена инвестиционная эффективность проекта до разработки. Проведен анализ и балансировка данных. Выбран метод оценки трудоемкости. Разработана модель с применением машинного обучения. Результаты позволяют по обозначению предсказывать объем, оценивая целесообразность и сокращая затраты.

Ключевые слова: математическое моделирование; машинное обучение; нейронные сети.

При разработке сложных изделий бортовой аппаратуры трудоемкость является ключевым фактором стоимости. Учитывая индивидуальный подход к разработке единичных изделий, возникает необходимость в прогнозировании трудозатрат до начала работ.

Для решения этой задачи была выдвинута гипотеза о возможности математического моделирования проекта с использованием алгоритмов машинного обучения [1]. В качестве исходных данных была использована база данных, содержащая информацию о всех ранее разработанных проектах в организации.

В организации в качестве информационной системы используется IC:PLM. Для решения поставленной задачи потребовалось ввести параметр количества листов документа, приведенных к формату А4, чтобы иметь представление об объеме проекта по категории. Категории изделий в IC:PLM представляют собой электронные структуры, содержащие всю информацию о сборочной единице и всех входящих в нее документах, сборочных единицах, деталях, материалах, прочих изделиях и комплектах. Данные из информационной системы в файл .xls были экспортированы с использованием дополнительной программы, специально написанной для решения поставленной задачи. В таблице представлены данные по столбцам: классификация, количество листов, приведенных к формату А4, и количество входящих сборочных единиц. Таким образом, были сформированы данные для датасета.

Для обучения модели необходимо использовать датасет в формате .csv, также все данные в нем по каждой строке должны быть записаны в одной колонке. Поэтому необходимо было преобразовать .xls в .csv и провести форматирование таблицы. Это удалось осуществить с использованием формул, поддерживаемых программой Microsoft Excel. В результате был создан датасет.

Репрезентативность в данном случае обеспечивается большим опытом разработки. Предполагается, что будут оцениваться только проекты, похожие на которые были ранее произведены. Таким образом, считаем, что выборка является

репрезентативной, так как в нее входят все электронные структуры всех изделий, разработанных за всю историю организации.

База данных была предварительно проанализирована на возможность ее использования для текущего проекта, и были предприняты действия по ее балансировке для потенциального увеличения точности работы модели. А именно: для оценки трудоемкости проекта необходимо производить его декомпозицию в соответствии со структурной схемой, это позволило получить более точные результаты моделирования.

В процессе анализа было выявлено, что в качестве показателя оценки может быть использовано обозначение изделия в соответствии с общероссийским классификатором [2].

В результате задача была приведена к методу линейной регрессии [3] и на его основе была разработана и обучена модель на ранее подготовленных данных. Таким образом, были достигнуты первые результаты, которые были проверены на ранее разработанных проектах, и точность модели была признана удовлетворительной для решения поставленной цели. Точность модели, проверяемая с помощью средней суммы абсолютной разницы между фактическим значением и прогнозируемым значением, составила 81 %.

Проект выполнен при поддержке программы развития МИЭТ до 2030 года.

Литература

1. Элбон Крис. Машинное обучение с использованием Python. Сборник рецептов: Пер. с англ. — СПб.: БХВ-Петербург, 2019. — 384 с. ISBN 978-5-9775-4056-8.
2. ОК 012-93. Общероссийский классификатор изделий и конструкторских документов (классификатор ЕСКД).
3. Баранов А. О., Музыко Е. И., Павлов В. Н. Оценка эффективности инновационных проектов с использованием опционного и нечетко-множественного подходов. — Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2018. — 336 с.

УДК 004

Оптимизация процессоров для эффективной работы нейронных сетей

Сметанин Е. А.¹, Сметанин И. А.^{1,2}, Быканова У. Ф.¹, Асоян А. Р.^{1,3}

¹ *Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
asoyan-ar@rudn.ru*

² *МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
smetaniin.i@bmstu.ru*

³ *Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет
125319, г. Москва, Ленинградский просп., 64
asoyan.ar@mail.ru*

В реализуемой системе мониторинга состояния водителя мы использовали конволюционные нейронные сети (CNN), способные в реальном времени обрабатывать видеосигнал.

Ключевые слова: система мониторинга состояния водителя; CNN; видеосигнал.

Для эффективной работы нейронных сетей критически важно разработать специализированные процессоры. Нейронные сети, особенно CNN, требуют значительных вычислительных ресурсов для выполнения операций свертки и матричных умножений [1]. Оптимизация использования памяти и управление кеш-памятью играют ключевую роль в минимизации задержек при передаче данных между памятью и вычислительными блоками [2]. В условиях мобильных устройств и систем с ограниченной энергией особенно важна энергоэффективность, для чего применяются технологии, такие как DVFS и эффективное управление питанием [3].

Параллельные вычислительные блоки, включая массивы матричных умножителей, значительно ускоряют выполнение операций в нейронных сетях [4]. Эффективное использование локальной памяти и многоуровневого кеша способствует повышению пропускной способности системы и минимизации задержек [5]. Процессоры, оптимизированные для выполнения свертки и функций активации, способствуют значительному улучшению производительности нейронных сетей [6].

Для эффективного использования специализированных процессоров необходимы оптимизированные библиотеки, поддерживающие популярные фреймворки, такие как TensorFlow и PyTorch [1, 2]. Google TPU и NVIDIA GPU с Tensor Cores представляют собой специализированные архитектуры, оптимизированные для операций над тензорами в нейронных сетях [3, 4]. ASIC и FPGA обеспечивают высокую производительность и гибкость настройки для работы с CNN [5, 6]. Их разработка способствует значительному улучшению производительности и энергоэффективности нейронных сетей в различных приложениях.

Литература

1. Krizhevsky A., Sutskeve I. and Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // Communications of the ACM 60.6 (2017): 84–90.



2. Sze V. et al. Efficient processing of deep neural networks: A tutorial and survey // Proceedings of the IEEE 105.12 (2017): 2295–2329.
3. Google. Google TPU: An in-depth guide. URL: <https://cloud.google.com/tpu/docs/in-depth>.
4. NVIDIA. NVIDIA Tensor Cores. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/tensor-cores>.
5. Han S. et al. Learning both weights and connections for efficient neural network // Advances in Neural Information Processing Systems.
6. Abadi M. et al. {TensorFlow}: a system for {Large-Scale} machine learning // 12th USENIX symposium on operating systems design and implementation (OSDI 16). 2016.



УДК 004.032.26

Нейросетевой подход к прогнозированию разводимости при проектировании СБИС с учетом начальных параметров топологии

Сайбодалов М. Х.^{1,2}, Дашиев М. В.^{1,3}, к. ф.-м. н., Карандашев Я. М.^{1,2}, Желудков Н. В.¹, Кочева Е. С.¹

¹ ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
maratsaibodalov@gmail.com

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

³ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработано нейросетевое решение задачи оценки карты разводимости на ранних этапах топологического проектирования цифровых блоков СБИС. Раннее предсказание разводимости позволит выбрать характеристики проектируемого блока, тем самым сократив число запусков САПР и общее время проектирования схемы.

Ключевые слова: СБИС; карта разводимости; машинное обучение; нейронные сети.

Одним из этапов топологического проектирования цифровых блоков СБИС является оценка разводимости межсоединений элементов на кристалле, которая и определяется как отношение числа необходимых межсоединений к числу доступных для разводки треков металлизации в заданной области. Если это соотношение не превышает 100 %, то нарушение разводимости в рассматриваемой области отсутствует. Большинство работ по предсказанию метрики разводимости связаны с графовыми или конволюционными нейронными сетями [1–2].

В данной работе мы предлагаем применять конволюционные сети, используя оценку, полученную с помощью алгоритма RUDY [3] в виде изображения. Наше главное нововведение заключается в использовании начальных параметров размещения, которые никогда ранее не применялись в других работах. Эти параметры выбираются до этапов размещения и трассировки и оказывают сильное влияние на окончательную карту разводимости. В этой работе мы рассматриваем четыре параметра: начальная плотность заполнения (core utilization), вид сетки земли — питания (pg type), количество металлов, а также параметр, запрещающий определенный процент трек для разводки (layer adjustment). На рис. 1 показано, как изменение начальной плотности заполнения влияет на конечную карту разводимости.

В качестве набора данных мы используем открытый датасет блоков openABC-D [4], представленных в виде RTL. Все эти дизайны были запущены с различными параметрами, о которых мы упоминали ранее. Затем для каждого из этих образцов мы рассчитываем априорные значения разводимости с помощью алгоритма RUDY. Для каждой сети в дизайне мы рассчитываем площадь

проводника/сети так, как это описано в оригинальной статье. Также в этой работе мы используем плотность ячеек, которая просто представляет собой количество ячеек в определенной области. Затем эти значения используются в качестве входных данных для наших моделей. Мы разделили этот набор данных на обучающую и валидационную выборки так, чтобы они не пересекались.

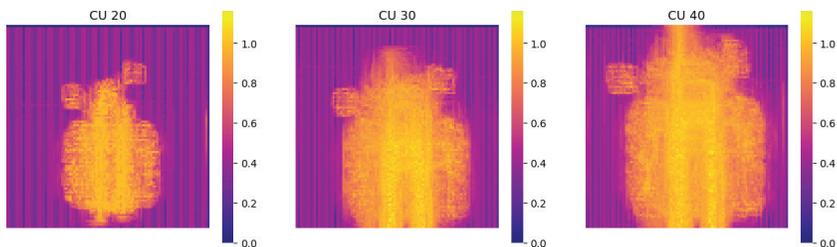


Рис. 1. Влияние параметра core utilization на итоговую карту разводимости

В табл. 1 представлены результаты работы наших моделей. В качестве метрики используется корреляция Пирсона, как и в других статьях по данной тематике. Можно сказать, что предложенные модели справляются с предсказанием разводимости, модель pix2pix делает это лучше остальных. На рис. 2 представлен пример результата работы модели. Основным недостатком, влияющим на результат, является малое количество данных для обучения. В будущем мы планируем увеличить количество дизайнов в несколько раз, что должно поспособствовать лучшим результатам работы моделей.

Таблица 1. Корреляция Пирсона между предсказанными и правильными картами разводимости для трех дизайнов и трех нейросетевых архитектур

Дизайн	UNet	Attention UNet	Pix2pix
eth_top	0,641	0,703	0,784
mc_top	0,805	0,807	0,847
fpu	0,747	0,763	0,777

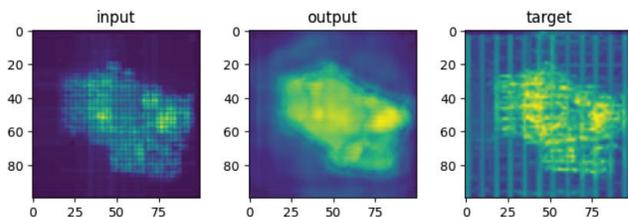


Рис. 2. Пример предсказания модели pix2pix



Литература

1. Kirby R., Godil S., Roy R., Catanzaro B. Congestionnet: Routing congestion prediction using deep graph neural networks // 2019 IFIP/IEEE 27th International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), 2019. P. 217–222.
2. Yang S., Yang Z., Li D., Zhang Y., Zhang Z., Song G. and Hao J. Versatile multi-stage graph neural network for circuit representation // Advances in Neural Information Processing Systems, 2022. Vol. 35.
3. Spindler P. and Johannes F.M. Fast and accurate routing demand estimation for efficient routability-driven placement // 2007 Design, Automatin & Test in Europe Conference & Exhibition, Nice, France, 2007. P. 1–6. DOI: 10.1109/DATE.2007.364463.
4. Chowdhury A. B., Tan B., Karri R., Garg S. OpenABC-D: a large-scale dataset for machine learning guided integrated circuit synthesis, 2021. arXiv 2110.11292.

УДК 004

Интеграция алгоритмов искусственного интеллекта для распознавания изображений на одноплатных компьютерах: методы и практическое применение

Ахметшин Д. А.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68
AkhmetshinDA@corp.knrtu.ru*

В последние годы в интернет-индустрии активно развиваются умные решения, охватывающие широкий спектр устройств, таких как телефоны, автомобили, чайники, часы и умные дома. Современные технологии позволяют автомобилям самостоятельно доставлять пассажиров до пункта назначения и парковаться. Компьютеризация и обработка больших данных с использованием сенсоров и камер помогают анализировать текущую ситуацию и управлять действиями автомобиля. Обучение с подкреплением позволяет автопилоту улучшаться, минимизируя ошибки и повышая безопасность. В статье рассматриваются методы распознавания изображений и алгоритмы машинного обучения, применимые для одноплатных компьютеров, таких как Raspberry Pi, для создания эффективных и надежных систем распознавания.

На сегодняшний день активно развиваются умные решения в интернет-индустрии: телефоны, автомобили, чайники, часы и умные дома. Благодаря современным технологиям скоро не нужно будет следить за дорогой: машина сама доставит до нужного пункта назначения и даже припаркуется в свободном месте. Принимающая сторона сама автоматически через Интернет сообщит геолокацию свободной парковки, и автопилот на автомобиле автоматически доедет до нужного места. Это обусловлено тем, что посредством компьютеризации и обработки больших данных посредством сенсоров автоматически анализируется текущая ситуация — как при помощи камер, так и различными сенсорами. Блок управления на компьютере принимает заранее обученный алгоритм действия в автомобиле. Например, остановить машину, двигаться по заданной траектории и т.д. Текущие алгоритмы постоянно улучшаются путем машинного обучения. Для автопилотов, как правило, используется обучение с подкреплением. В этом случае разрабатывают автопилот, который учится распознавать объекты и принимать решения на дороге. Конечно, иногда он ошибается, например сталкивается с ограждением, и в этом случае система мгновенно отправляет обратную связь и накапливает ряд ошибок. Модель данных снова обучается на основе текущих ошибок, и в будущем автопилот при схожей ситуации принимает правильное решение — объезжает препятствие. Таким образом, после многочисленных поездок автопилот начинает управлять автомобилем с высоким уровнем безопасности.

В основе обучения с подкреплением лежит процесс марковского принятия решений [1], который описывается следующими элементами:

- 1) состояния (S) — пространство всех возможных состояний;
- 2) действия (A) — пространство всех возможных действий;

- 3) функция награды ($R(s, a)$) — ожидаемая награда за выполнение действия a в состоянии s ;
- 4) переходная функция ($P(s'|s, a)$) — вероятность перехода в новое состояние s' при выполнении действия a в состоянии s .

Обучение с подкреплением пытается найти оптимальную политику π^* , которая максимизирует ожидаемую суммарную награду:

$$\pi^*(s) = \arg \max_a \sum_{s'} P(s'|s, a) [R(s, a) + \gamma V(s')],$$

где γ — коэффициент дисконтирования, определяющий, насколько сильно агент учитывает будущие награды.

Алгоритм обучения с подкреплением

На практике для обучения автопилота используются различные алгоритмы, такие как Q-обучение, глубокое Q-обучение (DQN) и алгоритмы на основе политики (например A3C, PPO).

Пример Q-обучения:

1. Инициализируем Q-функцию $Q(s, a)$ произвольными значениями.
2. Повторение для каждого эпизода.

Начинаем с начального состояния s .

Повторяем, пока состояние не будет терминальным:

- выбираем действие a с использованием ϵ — жадной стратегии;
- выполняем действие a , наблюдаем награду r и новое состояние s' ;
- обновляем Q-функцию: $Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha [r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$;
- переходим в новое состояние s' .

В результате многократного повторения таких эпизодов Q-функция будет приближаться к оптимальной и автопилот начнет принимать более правильные и безопасные решения на дороге.

Для решения предлагается использовать одноплатные компьютеры, такие как Raspberry Pi и Arduino, для обработки данных. Эти устройства позволяют подключать множество сенсоров и камер для получения необходимых данных. Распознавание изображений включает в себя множество алгоритмов и методов машинного обучения и компьютерного зрения, которые позволяют извлекать и интерпретировать информацию из визуальных данных.

Основные методы распознавания изображений:

1. Классические методы компьютерного зрения:
 - метод гистограмм ориентированных градиентов (HOG);
 - метод локальных бинарных шаблонов (LBP);
 - метод обнаружения краев Канны.
2. Методы машинного обучения:
 - алгоритмы классификации (например SVM, KNN);
 - метод опорных векторов (SVM).
3. Глубокое обучение:
 - сверточные нейронные сети (CNN);
 - архитектуры, такие как VGG, ResNet, Inception, EfficientNet.

Алгоритм работы распознавания изображений на устройстве Raspberry Pi:

1. Настройка камеры и захват изображений.
2. Предобработка изображений.



3. Загрузка и выполнение модели TensorFlow Lite [2] для распознавания объектов.
4. Отображение результатов.

Пример кода на Python

```
import cv2
import numpy as np
import tensorflow as tf
from tensorflow.lite.python.interpreter import Interpreter
from picamera.array import PiRGBArray
from picamera import PiCamera
import time

# Загрузка модели TensorFlow Lite
model_path = 'model_v1_1.0.tflite'
interpreter = Interpreter(model_path)
interpreter.allocate_tensors()

# Получение информации о входных и выходных тензорах
input_details = interpreter.get_input_details()
output_details = interpreter.get_output_details()

# Параметры камеры
width, height = input_details[0]['shape'][1], input_details[0]['shape'][2]

# Настройка камеры
camera = PiCamera()
camera.resolution = (width, height)
camera.framerate = 30
rawCapture = PiRGBArray(camera, size = (width, height))

# Делаем паузу для настройки камеры
time.sleep(2)

# Классы объектов, которые распознает модель
labels = ["background", "aeroplane", "bicycle", "bird", "boat", "bottle", "bus",
"car", "cat", "chair", "cow", "diningtable", "dog", "horse", "motorbike",
"person", "pottedplant", "sheep", "sofa", "train", "tvmonitor"]

# Захват и обработка изображений
for frame in camera.capture_continuous(rawCapture, format = »bgr», use_video_
port = True):
    image = frame.array
    # Предобработка изображения
    input_data = cv2.resize(image, (width, height))
    input_data = np.expand_dims(input_data, axis = 0)
    input_data = np.float32(input_data)
    # Запуск модели
    interpreter.set_tensor(input_details[0]['index'], input_data)
    interpreter.invoke()
    # Получение результата
    output_data = interpreter.get_tensor(output_details[0]['index'])
    results = np.squeeze(output_data)
    # Отображение результатов
    top_result = np.argmax(results)
```

```
label = labels[top_result]
confidence = results[top_result]
# Вывод результата на изображение
cv2.putText(image, f'{label} ({confidence:.2f})', (10, 30), cv2.FONT_HERSHEY_
SIMPLEX, 1, (255, 0, 0), 2, cv2.LINE_AA)
cv2.imshow(«Object Detection», image)
# Очистка потока
rawCapture.truncate(0)
# Завершение по нажатию клавиши 'q'
if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
    break
# Освобождение ресурсов
cv2.destroyAllWindows()
camera.close()
```

Этот код демонстрирует базовый алгоритм распознавания объектов с использованием камеры Raspberry Pi и модели TensorFlow Lite.

Примеры использования:

- использование Raspberry Pi Camera Module для захвата изображений;
- развертывание TensorFlow Lite для выполнения задач распознавания изображений на устройстве;
- использование библиотеки OpenCV для предварительной обработки изображений.

Заключение

Использование одноплатных компьютеров для распознавания изображений и сбора данных предлагает доступные и эффективные решения для различных приложений. Оптимизация алгоритмов и использование специализированного аппаратного обеспечения позволяют значительно улучшить производительность и точность распознавания, делая такие системы более надежными и масштабируемыми, в результате их можно портативно подключать на различные устройства, такие как автомобили.

Литература

1. Саттон Р.С., Барто Э.Дж. Обучение с подкреплением: Введение = Reinforcement Learning. — 2-е изд. — М.: ДМК Пресс, 2020. — С. 552.
2. Вандер Плас Д. Python для сложных задач: наука о данных. 2-е межд. издание. — СПб.: Питер Пресс, 2024. — С. 592.

УДК 004.032.26

Исследование эффективности методов обучения нейронных сетей в решении задачи классификации на основе малых данных

Маврин И. А., д. ф.-м. н. Андреева Н. В., д. т. н. Рыдин Е. А.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
iamavrin@etu.ru

Проведено исследование эффективности обучения импульсных нейронных сетей с использованием правил обучения STBP, deSNN, модифицированного ReSuMe. Приводятся результаты оценки сравнительной эффективности работы алгоритмов обучения при решении задачи классификации записей ЭЭГ базы данных VCI Competition IV.

Ключевые слова: импульсная нейронная сеть; обучение с учителем; ЭЭГ; нейроморфная электроника.

При решении задач анализа биологических сигналов, таких как записи ЭЭГ, данные, доступные для обучения, часто ограничены записями десятков пациентов. Такой объем обучающей выборки оказывается недостаточным при использовании традиционных алгоритмов машинного обучения. Считается, что импульсные нейронные сети (ИмНС) показывают более высокую эффективность обучения на малых данных.

Для распознавания биологических сигналов при помощи ИмНС наиболее часто используются правила обучения с учителем на основе постулата Хебба или метода градиентного спуска. Постулат Хебба — это нейробиологический принцип, описывающий правила укрепления и ослабления синаптических связей в зависимости от активности пресинаптического и постсинаптического нейронов. Метод градиентного спуска заключается в аналитическом вычислении градиента функции ошибки по параметрам нейросети. Применение этого метода для обучения ИмНС является сложной задачей из-за невозможности аналитического вычисления градиента и требует использования приближенных методов.

Для обучения ИмНС классификации ЭЭГ чаще прочих применяются правила STBP (spatiotemporal backpropagation, обратное распространение в пространстве и времени) [1] и deSNN (dynamic evolving SNN, динамическая эволюционирующая импульсная нейронная сеть) [2].

В рамках исследования было проведено сравнение правил обучения STBP, deSNN и модифицированного правила ReSuMe (remote supervised method, метод обучения с удаленным наблюдением) [3].

1) Правило STBP основано на методе градиентного спуска. Оно позволяет производить обучение многослойных ИНС с произвольной топологией связей. При этом область его применения ограничена обучением ИмНС, использующим частотное или порядковое кодирование сигнала. При обучении ИмНС с применением STBP меняются только величины синаптических весов и порог срабатывания нейрона.

2) Правило deSNN позволяет постепенно наращивать количество нейронов ИмНС, шаг за шагом приближая функционирование ИмНС к требуемому. Оно применяется для обучения многослойных ИмНС прямого распространения. Важной особенностью является то, что обучение каждого нового добавляемого нейрона происходит без изменения весов других нейронов.

3) ReSuMe — правило обучения многослойных ИмНС, основанное на постулате Хебба. Оно позволяет обучать многослойные ИмНС прямого распространения как единое целое, не требуя использования приближенных методов расчета градиента, и занимает промежуточное положение между предыдущими двумя алгоритмами. Оно поддерживает использование временного кодирования сигнала. В ходе обучения с применением ReSuMe производится одновременная настройка весов и задержек прохождения сигнала по синапсам.

Перечисленный набор правил обучения позволяет сравнить результаты, достижимые при обучении ИмНС, с применением правил на основе метода градиентного спуска и на основе постулата Хебба. Обучение производилось на основе записей ЭЭГ из состава базы данных BCI Competition IV [4]. Производилось сравнение достигнутых результатов по следующим критериям:

- 1) количество нейронов, необходимое для функционирования сети;
- 2) достигнутая точность классификации;
- 3) воспроизводимость результатов обучения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2020-0013.

Литература

1. Wu Y., Deng L., Li G. et al. Spatio-Temporal Backpropagation for Training High-Performance Spiking Neural Networks // *Frontiers in Neuroscience*, 2018. Vol. 12.
2. Kasabov N., Dhoble K., Nuntalid N., Indiveri G. Dynamic evolving spiking neural networks for on-line spatio- and spectro-temporal pattern recognition // *Neural Networks*, 2013. Vol. 41. P. 188–201.
3. Sporea I., Grüning A. Supervised Learning in Multilayer Spiking Neural Networks // *Neural Computation*, 2013. Vol. 25. № 2. P. 473–509.
4. Brunner C., Leeb R., Muller-Putz G. R., Schlogl A. BCI Competition 2008 — Graz data set A, 2008.

УДК 004.932.4

Применение методов глубокого обучения в задаче коррекции эффектов оптической близости

Московцев А. Ф.^{1,2}, Харченко Е. Л.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В данной работе были протестированы три модели глубоких нейронных сетей на наборе топологических элементов для слоя металлов с характерными размерами 32 нм в целях разработки эффективного решения проблемы коррекции элементов топологии при проектировании фотошаблонов.

Ключевые слова: OPC; deep learning; image-to-image.

Вычислительная литография является одним из важнейших направлений исследований для дальнейшего масштабирования технологии производства путем улучшения точности переноса топологического дизайна с фотошаблона на пластину [1]. По мере уменьшения проектных норм достижение точного переноса элементов топологии становится все более сложной задачей из-за оптических эффектов близости [2]. Данные эффекты вызывают искажения элементов, получаемых в кремниевой пластине, что приводит к снижению производительности технологического процесса и уменьшению выхода годных. Коррекция эффектов оптической близости (Optical Proximity Correction — OPC) — важнейшая техника повышения разрешающей способности фотолитографии, используемая для предотвращения нежелательных оптических эффектов путем внесения преднамеренных изменений в геометрию фотошаблона для повышения точности формирования изображения в фоторезисте.

К числу основных решений в области OPC относятся OPC на основе правил (rule-based OPC), OPC на основе моделирования (model-based OPC), OPC на основе метода инверсной литографии (Inverse lithography technique), а также методы на основе машинного и глубокого обучения [3, 4].

Однако описанные методы имеют ряд недостатков. Так, для обработки кристалла методами model-based OPC или ИЛТ, использующими традиционные методы моделирования, заложенные в САПР, может потребоваться несколько дней работы CPU/GPU. Методы на основе машинного обучения достигают высокой точности в предсказании величины сдвига для фрагментов топологии и обладают большим быстродействием, однако сам процесс сбора данных и постобработка предсказаний моделей не являются оптимальными для внедрения в производственный процесс. Модели на основе глубокого обучения (deep learning — DL) позволяют сократить время выполнения генерации маски. По сравнению с традиционными методами, требующими множества итераций для генерации маски, методы на основе DL позволяют генерировать маску за одну итерацию. Кроме того, использование различных функций потерь может значительно улучшить результаты коррекции. Последние работы в области DL [5, 6] предлагают перспективную альтернативу, применяя методы переноса изображения (image-to-image translation) для предсказания



топологических коррекций, где в качестве обучающих данных используются пары изображений — исходный дизайн элемента топологии и соответствующая ему коррекция (откорректированная маска).

Для обучения моделей был использован набор топологических элементов для слоя металлов с характерными размерами **32 нм**, найденный в открытом доступе и дополненный собственной откорректированной топологией. Файлы топологии были переведены в бинарные изображения разрешением **1024×1024 пикселя**, где каждый пиксель соответствует области **1 нм²** топологического элемента.

В ходе работы были протестированы три модели глубокого обучения для решения задачи DL-OPC: U-Net[7], **pix2pixHD**[8], **DAMO** (Deep Agile Mask Optimization) [9].

Производительность моделей оценивалась с точки зрения скорости генерации изображений и качества смоделированного изображения для полученной откорректированной маски. Для оценки точности моделей использовался следующий набор метрик: средняя величина ошибки размещения края (edge placement error — EPE) между исходным дизайном и смоделированным изображением на пластине; вариация процессного окна (process variation band — PVB), оценивающая устойчивость маски к изменяющимся условиям процесса; L2-норма разности между смоделированным изображением на пластине и исходным дизайном топологии.

Полученные результаты демонстрируют потенциал моделей глубокого обучения для эффективной и точной коррекции элементов топологии в фотолитографии.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // NanoRus, 2020. — Т. 13. — № 5s. — С. 13–19.
3. Tryasoguzov P. E. et al. Using Machine Learning Methods to Predict the Magnitude and the Direction of Mask Fragments Displacement in Optical Proximity Correction (OPC) // Opt. Mem. Neural Networks, 2021. Vol. 30. № 4. P. 291–297.
4. Yang H. et al. GAN-OPC: Mask optimization with lithography-guided generative adversarial nets // Proceedings of the 55th Annual Design Automation Conference, 2018. P. 1–6.
5. Karandashev I. M. et al. Investigating the Efficiency of Using U-Net, Erf-Net and DeepLabV3 Architectures in Inverse Lithography-based 90-nm Photomask Generation // Opt. Mem. Neural Networks, 2023. Vol. 32. № 4. P. 219–225.
6. Zheng S. et al. LithoBench: Benchmarking AI Computational Lithography for Semiconductor Manufacturing // Advances in Neural Information Processing Systems / ed. Oh A. et al. Curran Associates, Inc., 2023. Vol. 36. P. 30243–30254.
7. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. arXiv, 2015.
8. Wang T.-C. et al. High-Resolution Image Synthesis and Semantic Manipulation with Conditional GANs. arXiv, 2017.
9. Chen G. et al. DAMO: Deep Agile Mask Optimization for Full Chip Scale. arXiv, 2020.

УДК 004.896

Разработка подхода по выбору набора данных для нейросетей, моделирующих процесс экспонирования в фотолитографии, на основе нейрооператоров Фурье**Кошляков А. В.^{1,2}, Метельников А. А.¹**¹ ПАО «Сбербанк России»

117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Koshlakov.av@phystech.edu, AAMetelnikov@sberbank.ru

В данной работе предлагается подход по созданию набора данных, который содержит минимальное количество элементов в обучающей выборке, а с другой стороны, обладает информацией об искажениях в литографии, необходимой для обеспечения наибольшей обобщающей способности обученных на нем нейронных сетей с ограничениями.

Ключевые слова: нейронная сеть; вычислительная литография; нейрооператор Фурье; регуляризация; обобщающая способность нейронной сети.

Сегодня для моделирования процесса экспонирования в фотолитографии рассматриваются нейронные сети [1, 2], а в особенности применение физически информированных нейронных сетей и нейронных сетей с ограничениями [1]. В основном исследования нацелены на усовершенствование их архитектуры [1], а для составления обучающего набора данных рассматриваются известные в машинном обучении подходы [2].

Обучение нейронных сетей и проверка качества симуляции в статьях [1, 2] были проведены на синтетических данных. При использовании нейронных сетей для симуляции литографии потребуется получить обучающую выборку, включающую изображения реальной печати. Из-за трудоемкости процесса ручной съемки растровыми электронными микроскопами и постоянных изменений в технологическом процессе затруднительно будет каждый раз получать большую обучающую выборку (5000–10000 изображений структур), которая использовалась авторами статей [1, 2]. Поэтому актуальной является задача разработки набора данных, обеспечивающего наилучшую обобщающую способность при минимальном количестве данных.

Целью данной работы является разработка подхода по выбору набора данных, который содержит минимальное количество элементов в обучающей выборке, а с другой стороны, обладает информацией об искажениях в литографии, необходимой для обеспечения наилучшей обобщающей способности обученных на нем нейронных сетей с ограничениями.

Авторы считают, что новизна данной работы заключается в предложенном подходе сокращения набора данных, который основан на выборе обучающей выборки на основе анализа пространственных частот, имеющихся в распечатываемых на пластине структурах.



Все эксперименты в работе проведены на синтетических данных, полученных при помощи симулятора процесса экспонирования фотолитографии из [3]. В качестве обучающих выборок рассмотрено два набора синтетических данных:

- набор данных, который использовали авторы в работе [3] (открытый набор данных);
- сгенерированный при помощи предложенного подхода набор данных.

Для проверки качества обучения использовалась выборка из открытого набора данных.

Проведен ряд экспериментов по обучению нейронной сети с ограничениями по физике DOINN [1], которые показали, что нейронная сеть, обученная на наборе данных, полученных при помощи предложенного подхода, имеет сравнимую с обученной на открытом наборе данных обобщающую способность при тестировании на выборке из открытого набора данных.

Литература

1. Yang H. et al. Generic lithography modeling with dual-band optics-inspired neural networks // Proceedings of the 59th ACM/IEEE Design Automation Conference, 2022. P. 973–978. DOI: 10.1145/3489517.3530580.
2. Shao H. et al. Data-Driven Approaches for Process Simulation and Optical Proximity Correction // 2023 28th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), 2023. P. 721–726. DOI: 10.1145/3566097.3568362.
3. Jiang B. et al. Neural-ILT: migrating ILT to neural networks for mask printability and complexity co-optimization // 2020 IEEE/ACM International Conference On Computer Aided Design (ICCAD), 2020. P. 1–9. DOI: 10.1145/3400302.3415704.



УДК 004.431

Инструмент для автоматизации входного контроля топологий при проектировании фотошаблонов

Колупаев М. Е., Медведев К. А., Рябинин А. Д.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

mkolupaev@niime.ru

В работе предложена реализация инструмента для автоматизации входного контроля топологий при приеме информации для проектирования фотошаблонов (ФШ). Описан алгоритм проверки топологии на соответствие требованиям маршрута проектирования ФШ. Разработано приложение для хранения информации о составе актуальных комплектов средств проектирования (КСП).

Ключевые слова: комплект средств проектирования (КСП); входной контроль; фотошаблоны (ФШ).

Одним из важнейших факторов в производстве микросхем является качество производимой продукции. Изготавливаемые микроприборы должны соответствовать технологическому маршруту [1] и предусмотренным в нем правилам. Ошибки, допущенные при разработке ИС, могут приводить к существенному снижению показателя выхода годных изделий, поэтому необходимо обнаруживать их на ранних стадиях [2]. Для обеспечения качества продукции на должном уровне необходимо, чтобы на всех стадиях проектирования и производства ИС проходил этап контроля [3].

В работе рассматривается программный инструмент для автоматизации выполнения входного контроля при приеме информации для проектирования фотошаблонов. Он состоит из базы данных с технологической информацией, веб-интерфейса для взаимодействия с пользователем, сервиса для запуска необходимых проверок и вспомогательного ПО для хранения информации о составе актуальных КСП.

Проверка топологии выполняется в два этапа:

- первый этап — проверка топологии на соответствие требованиям маршрута проектирования ФШ, которая включает определение технологического маршрута, проверку центрирования, состава топологических слоев и т. д.;
- второй этап — проверка на соответствие правилам проектирования (DRC — design rule check).

Внедрение разработанных программных инструментов позволило обеспечить:

- существенное снижение вероятности возникновения ошибок из-за человеческого фактора на этапе проектирования ФШ;
- значительное сокращение временных затрат на прием топологической информации;
- возможность накопления статистической информации для последующего анализа влияния конкретных ошибок в топологии на показатель выхода годных.



Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Grochowski A., Bhattacharya D., Viswanathan T. R. and Laker K. Integrated circuit testing for quality assurance in manufacturing: history, current statu. and future trends // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, Aug. 1997. Vol. 44. № 8. P. 610–633.
3. Королева А. Н. Разработка научно-методических основ управления качеством базовых технологий, используемых при проектировании и производстве сверхбольших интегральных схем: дис. на соискание ученой степени канд. наук. — 2021.

УДК 004.422.8

Программный модуль автоматизации процесса подготовки управляющей информации для производства фотошаблонов

Шохрин Р. С.^{1,2}, Костюк М. Д.¹, Капкин И. Д.¹¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

rshokhrin@niime.ru, mkostyuk@niime.ru, ikapkin@niime.ru

В рамках данной работы была поставлена задача модернизации процесса подготовки и верификации управляющей информации для производства фотошаблонов. На основании рассмотренного маршрута был спроектирован модуль веб-приложения, позволяющий автоматизировать маршруты подготовки управляющей информации.

Ключевые слова: проектирование фотошаблонов; автоматизация; управляющая информация; разработка веб-приложений.

Введение

Ввиду различий в технологиях и технических спецификациях маршруты и отдельные шаги в подготовке управляющей информации могут варьироваться в зависимости от требований заказчика и технологических норм. Для ускорения обработки и внедрения таких маршрутов была поставлена задача по разработке спецификации описания маршрутов подготовки управляющей информации (УИ).

Модернизация описания маршрута подготовки УИ

Для решения задачи модернизации описания маршрута было решено разбить полное описание маршрута на две составляющие части: описание хода и порядка выполнения всех операций маршрута и описание каждой отдельной операции. Такой подход поможет внедрять новые маршруты и отдельные этапы значительно быстрее.

В качестве основы для спецификаций был выбран язык описания YAML (Yet Another Markup Language). Он удобен для заполнения человеком и программного чтения.

Для описания отдельных операций была разработана спецификация, обеспечивающая гибкость в описании правил получения данных для выполнения отдельного программного сценария из составленного пользователем файла-задания и полученных настроек конкретной исполняемой операции. Файл-описание операции должен содержать правила по получению и структуризации данных для последующего выполнения.

Разработка программного веб-приложения

Программный веб-модуль состоит из четырех независимых сервисов: сервиса интерфейса, сервиса организации маршрута, базы данных, сервиса запуска процедур.

В рамках программного комплекса база данных хранит:

- данные о местоположении конфигурационных файлов маршрута;
- информацию, связанную с состоянием выполнения программных сценариев маршрутов;



- ход выполнения отдельных процедур (лог).

В качестве инструмента запуска и контроля выполнения программных сценариев используется сервис на основе программ-демонов. Демон (daemon) — это программа, которая запускается в фоновом режиме (без терминала или пользовательского интерфейса), ожидая событий и предлагая службы для их выполнения.

Сервис интерфейса предоставляет возможности по конфигурации всего маршрута подготовки УИ и его отдельных операций. Основной задачей сервиса является отображение информации, связанной с маршрутом и ходом его выполнения в режиме реального времени. Сервис организации маршрута является связующим звеном между сервисом пользовательского интерфейса и сервисом выполнения процедур маршрута подготовки УИ. Основные задачи модуля — обработка пользовательских данных маршрута подготовки УИ (файла-задания), формирование и структуризация данных маршрута подготовки УИ и его отдельных этапов, генерация сигналов и конфигурационных файлов для запуска выполнения подготовки УИ.

Заключение

Спроектированная архитектура программного комплекса имеет ряд преимуществ в масштабируемости и надежности. В программный комплекс легко внедрять новый функционал, а сама система отказоустойчива. Также программный комплекс обеспечивает быстрое внедрение или изменение маршрутов подготовки управляющей информации благодаря использованию файлов — описаний маршрутов.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Беспалов В. А. и др. Введение в дизайн фотошаблонов для изготовления микро- и наносистем / Под ред. В. А. Беспалова. — Mentor Graphics. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. — 207 с.
3. Беспалов В. А. и др. Введение в дизайн фотошаблонов для изготовления микро- и наносистем / Под ред. В. А. Беспалова. — Cadence MaskCompose. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 199 с.
4. Иванов В. В., Тельминов О. А. Подготовка управляющей информации для изготовления фотошаблонов. Перспективные методы и автоматизация // Сайт АО «НИИМЭ», 2019. — URL: <https://www.niime.ru/upload/pres/70219/03.pdf> (дата обращения: 20.04.2024).

УДК 51-74

Коррекция элементов фотонных ИС в целях учета ограничений фотолитографии

Степанова М. Г.^{1,2}, Харченко Е. Л.¹¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

mstepanova@niime.ru, ekharchenko@niime.ru

В работе исследована зависимость точности переноса рисунка в фоторезистивную маску от способа коррекции элементов на фотошаблоне. Реализован рецепт коррекции топологического рисунка, адаптированный для обработки фотонных интегральных схем, содержащих изогнутые элементы.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; фотолитография; фотошаблон; коррекция эффектов оптической близости.

Введение

Фотолитография играет важнейшую роль в производстве интегральных схем (ИС). При уменьшении проектных норм возникают трудности, связанные с переносом геометрии топологического рисунка на кремний [1]. С одной стороны, когда критические размеры топологических элементов достигают величин, сопоставимых с длиной волны экспонирующего излучения, возникают эффекты оптической близости, которые искажают переносимое изображение. Для минимизации влияния этих эффектов необходимо проводить соответствующую коррекцию рисунка (ОРС — optical proximity correction). С другой стороны, при проектировании фотошаблона необходимо выдерживать сетку, минимальные размеры и расстояния между элементами согласно его группе качества. Для учета этих особенностей топологический рисунок подвергается изменению различными алгоритмами [2, 3].

Коррекция топологии интегральной схемы

По сравнению с электронными ИС фотонные интегральные схемы (ФИС) имеют ряд отличительных черт. С точки зрения фотолитографии основная особенность ФИС заключается в том, что они содержат топологические элементы изогнутой формы. Алгоритмы коррекции топологических слоев не всегда адаптированы к таким фрагментам [4].

В работе были исследованы фрагменты ФИС, рассчитанной на технологию 180 нм. Рассмотренные изогнутые элементы изображены на рис. 1.

Произведена доработка ОРС-рецепта для корректной обработки неортогональных граней. Коррекция проводится следующим образом:

- 1) в топологии используются только вертикальные или горизонтальные линии;
- 2) контуры изогнутых элементов приближаются набором ломаных, отрезки которых не противоречат минимальному размеру сетки для фотошаблона данной группы качества;



- 3) при необходимости производится коррекция эффектов оптической близости во избежание слияний соседних элементов.

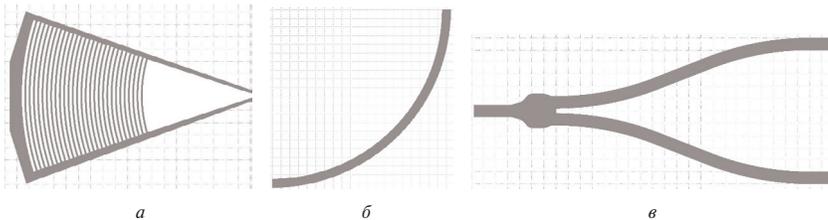


Рис. 1. Фрагменты топологии ФИС: а) решетка ввода/вывода; б) волноводный поворот на 90°; в) 1×2-делитель на основе многомодового интерферометра

Таким образом, полученный алгоритм включает в себя ортогонализацию изогнутых граней и их коррекцию на основании литографической модели. Верификация алгоритма производится на основании сравнения исходного рисунка и смоделированного в резисте после коррекции. Моделирование рисунка в фоторезисте проводится при различных условиях процесса для отслеживания стабильности проработки.

Влияние способа разбиения на точность полученного изображения

Разработанный рецепт позволяет корректировать топологию в зависимости от требований, накладываемых фотошаблоном, и от входных литографических моделей. Было проведено исследование отклонения полученного в резисте рисунка от исходного в зависимости от заданного шага разбиения при приближении кривых ломаными. На основании полученных данных можно сделать вывод об оптимальном способе ортогонализации изогнутых контуров ФИС.

Заключение

Реализованный в данной работе рецепт может быть использован для подготовки топологий ФИС к печати. В рамках дальнейшей работы необходимо провести исследование других способов ортогонализации линий с изгибами. Кроме того, полученный рецепт коррекции следует проверить на большем количестве типичных для фотонных интегральных схем элементов.

Литература

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.
2. Orlando B. et al. OPC for curved designs in application to photonics on silicon // Optical Microlithography XXIX. SPIE, 2016. Vol. 9780. P. 260–265.
3. Huang Z. et al. Preliminary round of OPC development in 180 nm node silicon photonics MPW platform // 2020 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS). IEEE, 2020. P. 1–3.
4. Giewont K. et al. 300-nm monolithic silicon photonics foundry technology // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019. Vol. 25. № 5. P. 1–11.



УДК 621.3.049

Перспективы развития производства фотошаблонов для технологий уровня до 65 нм в России

Свистунова В. В., Шарипов Р. А.

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

В работе произведен анализ производства фотошаблонов в России. Показаны особенности изготовления фотошаблонов для норм 180 нм и ниже с точки зрения технологии и тенденции развития смежных областей для организации полного цикла изготовления фотошаблонов с минимальным привлечением материалов иностранного производства.

Ключевые слова: фотошаблон; производство фотошаблонов.

Фотошаблон (ФШ) является одним из ключевых инструментов, используемых для формирования изображения ИС на полупроводниковых пластинах. Научно-технологическое развитие российской электронной промышленности обуславливает растущий спрос на комплекты ФШ, состоящие из ФШ различной степени сложности. Изготовление ИС с проектными нормами 180 нм уже требует использования сложных бинарных ФШ с элементами ОРС, а изготовление ИС с проектными нормами 130 нм и ниже невозможно без использования полутоновых фазосдвигающих ФШ.

В настоящее время в Российской Федерации предприятия, освоившие технологический процесс изготовления фотошаблонов для производства ИС с проектными нормами 90–65 нм, включая полутоновые фазосдвигающие ФШ, отсутствуют, поэтому российские производители электронной продукции вынуждены заказывать дорогостоящие фотошаблоны такого уровня сложности за рубежом.

На сегодняшний день в России передовыми технологиями изготовления ФШ владеет АО «ЗИТЦ», разработавшее технологический процесс изготовления сложных бинарных фотошаблонов, включая проектирование дизайна, с элементами компенсации оптической близости ОРС (Optical Proximity Correction) для производства ИС с проектными нормами 130 нм с применением техники повышения разрешения RET (Reticle Enhancement Technique).

Изготовление полутоновых фазосдвигающих ФШ связано с необходимостью обработки дополнительного технологического слоя MoSi (силицида молибдена) и с жестким контролем его оптических свойств, что, в свою очередь, требует использования новых технологических и контрольно-измерительных процессов, таких как:

- плазмохимическое травление полутоновых маскирующих слоев на основе MoSi (силицида молибдена);
- поиск и устранение прозрачных и непрозрачных дефектов в слое MoSi (силицида молибдена);
- контроль сдвига фаз.

Для обеспечения технологической независимости Российской Федерации в части обеспечения предприятий российской электронной промышленности необходимой номенклатурой и объемом ФШ требуемого уровня требуется не только



разработка технологических процессов изготовления ФШ для производства ИС с проектными нормами до 65 нм (с учетом тенденций развития предприятий — изготовителей ИС), но и локализация производства фотошаблонных заготовок (ФШЗ) для бинарных и полутоновых фазосдвигающих ФШ разных технологических уровней, производства кварца необходимого качества для изготовления на них ФШЗ, производства пелликов и рамок для их монтажа на поверхность ФШ для различных длин волн (193, 248 нм и расширенного диапазона пропускания 360–440 нм).

УДК 621.793.182

Сравнение оптических свойств слоев силицида молибдена и силицида тантала, применяемых для формирования фазосдвигающих покрытий фотошаблонов

Шарипов Р. А.¹, Лебедев Е. А.¹, к. т. н., Громов Д. Г.¹, д. т. н., Громов В. Д.¹,
Рязанов Р. М.²

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Sharipov769@mail.ru

² НПК «Технологический центр»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

Экспериментально исследованы особенности реактивного магнетронного осаждения фазосдвигающих слоев на основе силицидов молибдена и тантала для фотошаблонных заготовок. Определено влияние парциального давления азота на скорость осаждения, состав и оптические свойства формируемых покрытий.

Ключевые слова: магнетронное распыление; фазосдвигающие слои; силицид молибдена; силицид тантала.

При уменьшении топологических размеров элементов использование бинарных масок становится затруднительным из-за дифракционных явлений. Более того, при снижении норм топологических размеров элементов менее 130 нм использование бинарных масок становится невозможным, так как дифракционные эффекты ухудшают контрастность получаемого рисунка. Одним из решений данной проблемы является использование фазосдвигающих слоев, которые могут быть сформированы методом магнетронного распыления мишеней в среде химически активного газа. В настоящей работе рассмотрены особенности формирования и исследованы свойства фазосдвигающих слоев на основе силицидов молибдена и тантала.

В рамках данной работы фазосдвигающие слои на основе силицидов молибдена и тантала формировались с помощью реактивного магнетронного распыления. В качестве подложек использовались кварцевые стекла, которые устанавливались на карусели с планетарным вращением. Распыление мишеней кремния и молибдена, а также кремния и тантала производилось одновременно в среде азота и аргона. Управление составом формируемых слоев осуществлялось в результате изменения парциального давления азота и мощности распыления мишеней. Толщина и состав слоев контролировались с помощью атомно-силовой микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Исследование оптических свойств производилось с помощью эллипсометрии.

В результате проведенной экспериментальной работы было определено влияние парциального давления азота на скорость реактивного магнетронного осаждения, состав и оптические свойства фазосдвигающих слоев на основе силицидов молибдена и тантала. Было обнаружено, что при реактивном магнетронном распылении в среде химически активного газа образование химического соединения на поверхности мишени изменяет скорость ее распыления. В результате происходит существенное изменение состава формируемой пленки в узком диапазоне



парциальных давлений азота. Произведена оптимизация режимов осаждения слоев на основе силицидов молибдена и тантала для получения фазового сдвига 180° .

Работа выполнена в рамках НИР «Исследование технологии создания фотошаблонных заготовок и фотошаблонов, поиск технологических решений и создание на их основе макета фотошаблонной заготовки».

УДК 621.382.2/.3:681.518.5

Разработка системы оптической инспекции фотолитографического процесса

Паршин С. Н., Золкин Г. П., Васильченко Д. В., д. т. н. Ромашенко М. А.*Воронежский государственный технический университет**394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84**kpr@vorstu.com*

Цель программного обеспечения — повысить эффективность фотолитографических процессов при производстве микроэлектронных устройств. Это достигается снижением брака благодаря алгоритмам машинного зрения, что улучшает качество продукции и повышает производительность.

Ключевые слова: фотолитография; микроэлектроника; машинное зрение; машинное обучение; OpenCV; контроль качества.

Точность и разрешающая способность фотолитографического процесса являются ключевыми факторами, определяющими качество выпускаемых микроэлектронных изделий. Данный процесс отвечает за создание требуемых топологий на поверхности материалов, которые формируют структуры микроэлектронных компонентов. Любое отклонение основных параметров может привести к дефектам, поэтому требуется постоянный контроль производственного процесса.

При производстве микроэлектронных изделий возникают ошибки, связанные с формированием структуры, которые обусловлены как человеческим фактором, так и техническими ограничениями. Данные ошибки возникают вследствие несвоевременной реакции или недостаточной квалификации персонала. Кроме того, оборудование контроля качества не всегда может гарантировать необходимую точность и оперативность выявления отклонений технологических параметров. Недостаточный уровень автоматизации оборудования ведет к увеличению доли человеческого вмешательства, что негативно влияет на качество изделий и снижает производительность [1].

Одним из способов решения данной проблемы является применение автоматизированных систем контроля и управления, базирующихся на алгоритмах машинного зрения и машинного обучения. Основой разрабатываемой системы является алгоритм машинного зрения на базе библиотеки OpenCV, TensorFlow/Keras. Этот алгоритм позволяет анализировать изображения с высокой точностью, выявляя дефекты, которые трудно обнаружить при визуальном осмотре. OpenCV предоставляет широкий набор инструментов для обработки изображений, включая фильтрацию, сегментацию и распознавание объектов, что делает его идеальным выбором для задач контроля качества в фотолитографии [2]. Также в разрабатываемой системе используются вспомогательные библиотеки, такие как PyQt для работы с интерфейсом, Matplotlib для математических расчетов и визуализации, SQLite и PostgreSQL для работы с базами данных. Используемые в проекте алгоритмы машинного обучения проходят обучение на больших объемах данных, включающих как эталонные, так и дефектные образцы. Это позволяет системе эффективно различать корректные и некорректные топологические структуры, минимизируя вероятность ложных срабатываний.



Пользовательский интерфейс виртуального помощника позволяет обеспечить доступ к основным данным технологических процессов, включая текущие параметры, состояние оборудования, историю изменений, графики и аналитические изображения (рис. 1). Если обнаруживается дефект, система может автоматически корректировать параметры процесса в реальном времени для устранения ошибок или отправлять уведомление оператору для ручного вмешательства. Это позволяет предотвратить дальнейшее распространение брака и повысить общую эффективность производства.

Система включает базы данных для хранения шаблонов, эталонных, дефектных и отсканированных данных, а также результатов отчетов. Шаблоны содержат эталонные и дефектные изображения для калибровки и обучения. Эталонные данные помогают выявлять отклонения. Дефектные данные включают изображения с дефектами для анализа. Отсканированные данные содержат изображения и параметры процесса в реальном времени для контроля. Отчеты включают информацию о выявленных дефектах и принятых мерах, что улучшает производственные процессы.

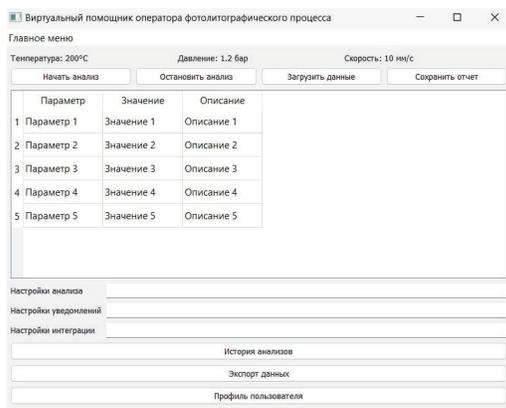


Рис. 1. Виртуальный помощник оператора фотолитографического процесса

Авторы считают, что в данной работе новым является алгоритм, использующий сформированные с помощью технологического оборудования изображения полупроводниковых пластин и нейронные сети для их анализа. Введение подобных инноваций в производственные процессы способствует снижению уровня брака и повышению производственной эффективности, обеспечивая высокое качество конечной продукции в микроэлектронной промышленности.

Литература

1. Ромашенко М. А., Васильченко Д. В., Пухов Д. А., Белецкая С. Ю. Проведение дефектовки печатных модулей с использованием нейронных сетей // Радиотехника, 2022. — Т. 86. — № 7. — С. 44–49. DOI: 10.18127/j00338486-202207-08. EDN QFGRGL.
2. Официальный сайт библиотеки машинного зрения OpenCV. — URL: <https://opencv.org> (дата обращения: 08.07.2024).



УДК 51-74

Алгоритм подбора оптимального литографического стека в целях минимизации эффекта стоячих волн

Уткина А. А., Харченко Е. Л.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

autkina@niime.ru, ekharchenko@niime.ru

В работе рассматривается проблема эффекта стоячих волн, возникающая в процессе экспонирования фоторезиста. Для предотвращения этого эффекта проведена серия виртуальных экспериментов с использованием набора фоторезистов и антиотражающих покрытий, рассчитанных на длину волны излучения 365, 248 и 193 нм.

Ключевые слова: вычислительная фотолитография; литографический стек; эффект стоячих волн; фоторезист; ARC; экспонирующее излучение; интерференция.

При разработке технологий, маршрутов и внедрении новых материалов возникает необходимость в настройке параметров технологического процесса [1]. Один из параметров, который требует настройки, — литографический стек. Он представляет собой набор слоев на подложке, который содержит фоторезист, антиотражающие покрытия и слои, выполняющие функцию жестких масок [2].

Интерференционные эффекты вносят существенный вклад в итоговое пространство интенсивности внутри литографического стека. Для формирования скрытого изображения в проэкспонированном фоторезисте важно учитывать не только падающий свет, но и отраженный от поверхности фоторезиста и подложки. Интерференция отраженных лучей приводит к эффекту стоячих волн, который носит деструктивный характер при формировании рельефа фоторезистивной маски (ФРМ) [3]. Эффект заключается в появлении чередующихся минимумов и максимумов интенсивности света в глубине фоторезиста. Области, соответствующие максимумам интенсивности, проявляются существенно быстрее, чем области, соответствующие минимумам интенсивности, что приводит к волнообразным краям элементов ФРМ. Добавление нижнего антиотражающего покрытия (Bottom Antireflection Coatings — ARC) помогает сгладить края ФРМ. Однако наличие нового слоя или изменение материала может изменить скрытое изображение в фоторезисте, поэтому важно подобрать толщины рассматриваемых материалов так, чтобы минимизировать эффект стоячих волн и обеспечить формирование элемента ФРМ требуемого размера.

В работе проводится исследование особенностей формирования распределения интенсивности экспонирующего излучения в ФРМ. Рассматривается влияние состава литографического стека на формирование эффекта стоячих волн с использованием экспонирующего излучения 365, 248 и 193 нм, рассматривается учет влияния пленки оксида кремния на подложке [4, 5]. С помощью компактного моделирования рассчитывается скрытое изображение в фоторезисте. Полученное распределение анализируется авторским алгоритмом, который проводит преобразование полученных данных, отсеивает неподходящие варианты и выбирает



наилучший среди рассматриваемых параметров. В результате определяется состав литографического стека, сводящий к минимуму эффект стоячих волн.

На основе полученных результатов разработан алгоритм подбора фоторезиста и BARC, который определяет оптимальный литографический стек. Разработан инструмент, который осуществляет подбор параметров в автоматизированном режиме, что ускоряет процесс замены материалов для процесса фотолитографии. В рамках дальнейшей работы планируется рассмотрение комбинаций нескольких BARC в литографическом стеке.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.
2. Su X. et al. Thickness optimization for lithography process on silicon substrate // Advances in Patterning Materials and Processes XXXII. SPIE, 2015. Vol. 9425. P. 503–516.
3. Uzodinma Okoroanyanwu. Chemistry and lithography / Uzodinma Okoroanyanwu. John Wiley & Sons, 2010.
4. Padmanaban M. et al. Bottom antireflective coatings for ArF, Kr. and i-line applications: a comparison of theory, desig. and lithographic aspects // Advances in Resist Technology and Processing XVI. SPIE, 1999. Vol. 3678. P. 550–561.
5. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В. Математическое моделирование кинетики высокотемпературного окисления кремния и структуры пограничного слоя в системе Si-SiO₂ // Физика и техника полупроводников, 2003. — Т. 37. — № 1. — С. 44–49.

УДК 531.7.08

Анализ и сравнение оптимизационных алгоритмов для задачи определения правил расстановки непечатаемых вспомогательных структур с учетом их влияния на шероховатость

Шамин Е. С.^{1,2}, Шарапов А. А.^{1,2}, Скуратов И. Д.^{1,2}, Горнев Е. С.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Описаны особенности формирования шероховатости боковых стенок структур, сформированных на базе фотолитографии. Показано, что непечатаемые вспомогательные структуры влияют на шероховатость. Для задачи определения правил их расстановки с учетом шероховатости проведено сравнение оптимизационных алгоритмов.

Ключевые слова: шероховатость; оптимизация; SRAF.

С развитием технологий производства интегральных микросхем характерные критические размеры топологических элементов значительно уменьшаются [1]. Наряду с этим типичные отклонения в их размерах, вызванные эффектом шероховатости боковых стенок, остаются практически неизменными, что приводит к деградации характеристик приборов для малых проектных норм [2, 3]. С учетом такой области исследований, как интегральная фотоника, для которой проблема шероховатости боковых стенок также имеет особую важность [4], можно с уверенностью сказать, что проблема шероховатости боковых стенок актуальна для любых топологических норм.

На формирование шероховатости боковых стенок для топологических структур, сформированных посредством фотолитографии, влияет множество факторов, таких как эффекты дефокусировки, параметры используемого фоторезиста, эффекты фотонного шума и т.д. В центре внимания данной работы лежит экспериментально подтвержденная связь [5] между шероховатостью и эффектом оптической близости. Как известно, одной из методик постобработки топологической информации для фотолитографии, находящейся в тесной связи с эффектом оптической близости, является расстановка по топологии непечатаемых вспомогательных структур (SRAF).

Как показано в работе, неправильная расстановка SRAF по топологии может не только привести к ухудшению процессного окна фотолитографии [6] и значительному понижению выхода годных [7], но и значительно увеличить амплитуду шероховатости боковых стенок. Вопрос определения правил расстановки SRAF обычно решается с применением оптимизационных алгоритмов с целевыми функциями на основе моделирования, отображающими качество проведения процесса фотолитографии. В работе проводится сравнительный анализ (бенчмаркинг) различных комбинаций алгоритмов оптимизации и целевых функций для этой задачи с учетом влияния SRAF на шероховатость боковых стенок. На основе этого анализа



проводится выбор наилучшей комбинации алгоритма и целевой функции для задачи определения правил расстановки SRAF.

Литература

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // *Наноиндустрия*, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.
2. Lee J. Y. et al. Effect of line-edge roughness (LER) and line-width roughness (LWR) on sub-100 nm device performance // *Advances in Resist Technology and Processing XXI*. SPIE, 2004. Vol. 5376. P. 426–433.
3. Шарапов А. А., Баранов Г. В. Анализ факторов воздействия на шероховатость топологических структур Si микроэлектроники // *Наноиндустрия*. — 2019. — № 89. — С. 232.
4. Shang H. et al. Investigation for sidewall roughness caused optical scattering loss of silicon-on-insulator waveguides with confocal laser scanning microscopy // *Coatings*, 2020. Vol. 10. № 3. P. 236.
5. Ban Y., Yang J. S. Layout aware line-edge roughness modeling and poly optimization for leakage minimization // *Proceedings of the 48th Design Automation Conference*, 2011. P. 447–452.
6. Mack C. *Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication*. John Wiley & Sons, 2008.
7. Liebmann L. W. et al. Optimizing style options for subresolution assist features // *Optical Microlithography XIV*. SPIE, 2001. Vol. 4346. P. 141–152.

УДК 621.3.049.779

Разработка технологического процесса электронно-лучевой литографии для изготовления реакционных ячеек оптического одномолекулярного секвенатора ДНК

Барбашева А. А.¹, Соловьева А. А.^{1,2}, Кугук А. К.¹, Коршаков Н. Д.^{1,2},
Муравьева Л. Н.¹, Алибеков Р. Ш.¹, Шувалова А. С.¹, Рыжков В. В.¹,
Родионов И. А.^{1,2}

¹ НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18

² ВНИИА им. Н. Л. Духова

127030, г. Москва, ул. Суцневская, 22

Разработан технологический процесс формирования органической маски электронного резиста на основе ПММА для последующего реактивного ионного травления алюминия. Маска позволяет получить массивы структур с характерным диаметром ~100 нм и стандартным отклонением <1%. Приведены характеристики разработанного технологического процесса.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография (ЭЛЛ); электронный резист (ЭР); нанесение ЭР; экспонирование ЭР; проявление ЭР; полиметилметакрилат (ПММА); органическая маска для реактивного ионного травления (РИТ); волновод нулевой моды (ВНМ); реакционная ячейка; оптическое одномолекулярное секвенирование.

Оптическое одномолекулярное секвенирование (ООС) является методом секвенирования нуклеиновых кислот (НК) третьего поколения, позволяющим решать задачи высокопроизводительного секвенирования длинных фрагментов НК, в том числе полногеномного секвенирования. Решение подобных задач играет определяющую роль в выявлении и изучении заболеваний различной этиологии. Основным структурно-функциональным элементом реакционной ячейки для ООС является ВНМ. Изготовление данного элемента включает в себя технологический процесс ЭЛЛ, что обуславливает актуальность разработки данного процесса.

В рамках разработки технологического процесса ЭЛЛ были проведены теоретический анализ, моделирование и оптимизация параметров технологических операций нанесения, термообработки, экспонирования и проявления ЭР на основе ПММА. Серия экспериментальных исследований включала в себя:

- 1) определение скорости вращения подложки на центрифуге в режиме утонения для получения необходимой толщины пленки ЭР;
- 2) определение дозы экспонирования и времени проявления ЭР для получения требуемого диаметра и профиля структур;
- 3) определение рабочего поля установки ЭЛЛ, обеспечивающего минимальный разброс размеров структур.

В результате проведенных исследований разработан процесс формирования органической маски, позволяющей методом РИТ получить массивы структур с характерным диаметром ~100 нм и стандартным отклонением <1%.

Исследование проводилось в нанотехнологическом центре МГТУ им. Баумана (НОЦ Функциональные Микро/Наносистемы, ID 74300).



Литература

1. Olzierski A., Raptis I. Development and molecular-weight issues on the lithographic performance of poly (methyl methacrylate) // *Microelectronic engineering*, 2004. Vol. 73. P. 244–251.
2. Mohammad M. A. et al. Interdependence of optimum exposure dose regimes and the kinetics of resist dissolution for electron beam nanolithography of polymethylmethacrylate // *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2010. Vol. 28. № 1. P. L1–L4.
3. Tiwari P. et al. Structural modification of poly (methyl methacrylate) due to electron irradiation // *Measurement*, 2014. Vol. 51. P. 1–8.



УДК 776.19

Моделирование неровности края линии в резисте с помощью модели со смешанными параметрами

Литаврин М. В.¹, Шарапов А. А.^{1,2}, Горнев Е. С.¹

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В рамках импортозамещения в сфере литографических материалов возрастает актуальность моделирования процесса литографии. В данной работе представлено дополнение модели LPM (Lumped Parameter Model) стохастическим модулем для оценки неровности края линии в резисте с помощью моделирования.

Ключевые слова: моделирование фотолитографии; химически усиленные резисты; неровность края линии.

Продолжающиеся работы в сфере импортозамещения литографических материалов для технологических норм 180–90 нм требуют все более глубокого понимания физико-химических процессов, проходящих в пленке фоторезиста в процессе фотолитографии. Понимание взаимосвязи отдельных параметров резиста можно получить с помощью проведения моделирования всего процесса фотолитографии.

В прошлой работе авторов [1] для этой цели применялась модель со смешанными параметрами (Lumped Parameter Model, LPM) [2, 3]. Данная модель позволяет довольно точно предсказать профиль резиста при относительно небольшом количестве требуемых входных параметров. И в отличие от компактных моделей [4, 5] в этой модели сохраняется физический смысл параметров фоторезиста.

В данной работе в эту модель вводится дополнительный стохастический модуль для расчета неровности края линии в резисте. Это реализуется через добавление случайных вариаций в выбранный входной параметр модели. На основании анализа экспериментальных данных для моделируемого резиста в качестве такого параметра был выбран контраст проявления. Таким образом, в используемую модель [1, 2] вводится дополнение:

$$R(x) = R_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\gamma + \Delta\gamma} \cdot S(x)^{\gamma + \Delta\gamma} + R_{\min},$$

где $R(x)$ — скорость проявления фоторезиста, $R_0(x)$ — эмпирическая константа проявления, R_{\min} — скорость проявления неэкспонированного резиста, E — доза экспонирования, E_0 — доза полного проявления, $S(x)$ — параметр, характеризующий степень деблокирования фоторезиста, γ — контраст фоторезиста, $\Delta\gamma$ — вариация контраста.

Сравнение с экспериментом проводилось для KGF-резиста с химическим усилением. Использовалась топология плотных линий с шагом структуры ~600 нм.

Работа выполнена в рамках гранта № 24-91-18002 Российского научного фонда.



Литература

1. Sharapov A. A. et al. Hybrid model of photolithography physicochemical processes for estimation of optical losses in waveguides // 11th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures; Book of Abstracts; May 2024.
2. Byers J., Smith M., Mack C. Lumped Parameter Model for Chemically Amplified Resists // Proc. SPIE, 5377, Optical Microlithography XVII, 2004.
3. Byers J., Smith M., Mack C. A. 3D Lumped Parameter Model for Lithographic Simulations // Optical Microlithography XV, Proc. SPIE, 2002. Vol. 4691. P. 125–137.
4. Харченко Е. Л., Соколова Е. В., Горнев Е. С. Развитие и применение компактных моделей фоторезистивной маски // Российский форум «Микроэлектроника-2022». — 2022. — С. 634–635. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53742363>.
5. Балан Н. Н. и др. Использование нейросетевых алгоритмов в задачах вычислительной литографии // Наноиндустрия, 2020. — № 96-2. — С. 543–548. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.543.548. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43004616>.



УДК 621.3.049

Определение коэффициента диффузии фотокислоты в химически усиленных фоторезистах

Конушкин И. А., Аккуратов А. В., Гапанович М. В.

ФИЦ ПХФ и МХ РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1

konushkinivan71@gmail.com

Создание высококачественных фоторезистов требует тщательного исследования кинетических параметров фотолитографического процесса. В данной работе определена константа диффузии фотокислоты в пленках коммерческого фоторезиста по данным ионной проводимости образцов, измеренной в зависимости от дозы лазерного облучения (248 нм).

Ключевые слова: коэффициент диффузии; пленка фоторезиста; фотогенератор кислоты; метод ионной проводимости; эксимерный лазер.

Развитие полупроводниковой индустрии связано со стремлением повысить скорость выполняемых операций и увеличить их количество, что сопряжено с миниатюризацией электронных устройств. Это стало возможным благодаря прогрессу в фотолитографии. Для повышения разрешающей способности данного процесса необходимо разрабатывать качественные фоторезисты с химическим усилением. Для этого необходимы данные о количественных характеристиках реакций, протекающих в фоторезистах в ходе рабочего процесса. Одним из таких параметров является коэффициент диффузии фотокислоты [1].

Для измерения диффузии кислоты в позитивных фоторезистах с химическим усилением подходит метод ионной проводимости. В его основе лежит определение концентрации кислоты с последующим измерением ионной проводимости пленки резиста. Коэффициент диффузии можно рассчитать по формуле

$$D = \frac{\sigma \cdot k_{\text{Б}} \cdot T}{C_{\text{кисл}} \cdot q^2}. \quad (1)$$

В качестве подложек для образцов использовались кремниевые пластины, покрытые нитридом титана. Для формирования тонких пленок толщиной от 0,5 до 10 мкм достаточно просушить фоторезист в течение полутора минут при 110 °С. Однако для толстых пленок такие условия не подходят даже при длительном времени сушки. Опытным путем было установлено, что пленки толщиной до 100 мкм удачно формируются в условиях вакуумной сушки при температуре 50 °С. Полученные пленки образуются без дефектов.

Для обеспечения необходимой интенсивности света и однородности лазерного пучка был подобран оптимальный состав газовой смеси: фтор — 0,24 % по объему, криптон — 1,2 % и гелий — 98,56 % [2, 3]. Рабочее напряжение составило 25 кВ. При частоте генерации импульса в 10 Гц образцы засвечивались однородно. Максимальная энергия одного импульса составила 1 мДж. Предполагаемая доза облучения, необходимая для нейтрализации примесей, контролирующей диффузию фотокислоты, должна быть более 9,5 мДж/см². Таким образом, для этого необходимо всего восемь импульсов.



Концентрацию образующейся кислоты в пленке фоторезиста определяли фотометрически с использованием красителя тетрабромфенолового синего [4] и п-толуолсульфокислоты как стандарта (рис. 1). Пересчет на концентрацию кислоты в пленке фоторезиста проводился по формуле

$$C_{\text{в пленке}} = C_{\text{в кювете}} \cdot V_{\text{р-ра}} \cdot k_{\text{пересчета}} \cdot \frac{N_A}{V_{\text{пленки}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{р-ра}}$ — объем раствора в кювете, л; $k_{\text{пересчета}}$ — коэффициент пересчета, определенный как отношение объема раствора фотохимической кислоты к объему аликвоты и равный 10, 13,33 или 16,67; $V_{\text{пленки}}$ — объем пленки фоторезиста, м³.

Электропроводность пленок измерялась на широкополосном диэлектрическом спектрометре Novocontrol в диапазоне частот от 10⁵ до 10² Гц. На низких частотах (0,3 Гц) ионная проводимость становится более заметной, поскольку ионы имеют достаточно времени для перемещения в приложенном электрическом поле [5]. По полученным данным рассчитывался коэффициент диффузии.

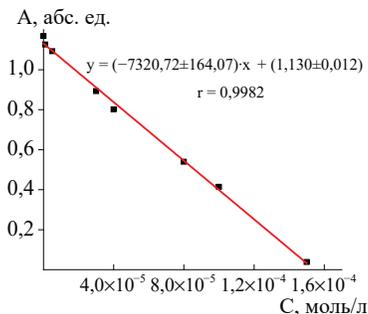


Рис. 1. Градуировочный график зависимости оптической плотности растворов от концентрации титранта

Для результатов серии 1 наблюдался существенный разброс данных, что связано со сложностью в точном определении толщины таких пленок и с недостаточной воспроизводимостью метода их формирования (рис. 2). Дополнительную погрешность при измерении ионной проводимости тонких пленок вносят электрические пробой. Результаты, значения которых отличались в несколько раз от среднего для серии 1, а также неэкспонированные образцы серии 2 выбраковывались.

Анализируя графики, можно заметить, что наиболее достоверные результаты получены для серии 2. Явной зависимости коэффициента диффузии от времени экспонирования не наблюдается. Средние значения коэффициента диффузии для первого метода — $D_{\text{дифф.}} = (6,17 \pm 10,27) \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ($S_r = 2,0$) и для второго метода — $D_{\text{дифф.}} = (4,2 \pm 0,6) \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ($S_r = 0,16$). Серии измерений не равноточные, наиболее достоверным является результат серии 2.

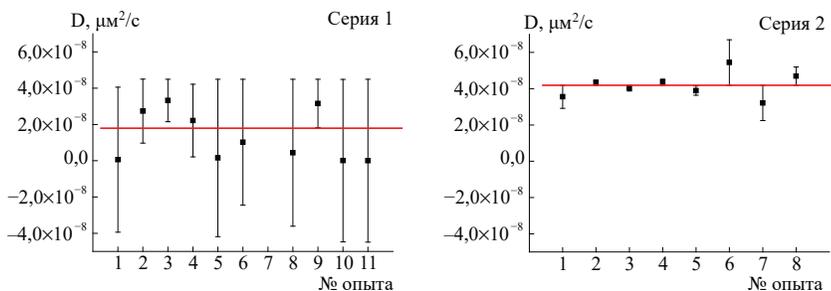


Рис. 2. Сравнение воспроизводимости результатов

Работа выполнялась в рамках тем. карты ФИЦ ПХФ И МХ РАН № 124020800013-7 «Научные основы разработки инновационных полимерных материалов для биомедицины и микроэлектроники».

Литература

1. Chris M. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, Ltd., 2007. P. 528. ISBN: 978-0-470-01893-4.
2. Patent № 5377217 United States, US0 8/042374, H01S 3/22. GAS MIXTURES FOR EXCIMER LASERS: appl. 02.04.1993: publ. 27.12.1994 / Gabzdyl J. T.; applicant BOC Group Ltd. 5 p.
3. Patent № 102517540 China C23C 8/08 (2006.01). Method of passivation of a gas configuration excimer laser device: appl. 20.12.2011: publ. 20.11.2013/ Pin Ch., Kelian Zh., Zhihong Zh.; applicant GUANGDONG SOUTHCHINA SPECIAL GAS INSTITUTE Co Ltd. 6 p.
4. Cheng-Tsung Lee, Wang Y., Roberts J., Henderson C. L. Cheng-Tsung Lee A Simple Method for Measurement of Photoacid Generator Photoreaction Kinetics in Formulated, Chemically Amplified Photoresist Films // Electrochemical and Solid-State Letters, 2007. Vol. 10. № 9. P. 273–277.
5. Новиков Г. Ф. Явления переноса, электропроводность в диэлектриках: Учеб. пособие к курсу лекций. — Воронеж-Черноголовка: изд-во ВГУ, 2000. — 203 с.



УДК 547.279.2

Разработка фотогенераторов кислоты на основе триарилсульфониевых солей и исследование их свойств

Сидельцев М. Е., Лолаева А. В., Кузнецов И. Е., Аккуратов А. В.

ФИЦ ПХФ и МХ РАН

142432, г. Черногловка, просп. Академика Семёнова, 1

Sideltsev.max@yandex.ru

Фотогенератор кислоты (ФГК) является одним из важнейших компонентов фоторезиста, определяющим эффективность процесса фотолитографии. Данная статья посвящена разработке трех фотогенераторов кислоты и изучению их физико-химических свойств (поглощение, квантовый выход).

Ключевые слова: фотогенератор кислоты; квантовый выход; коэффициент молярной экстинкции; фоторезист.

Развитие микроэлектронной промышленности напрямую связано с уменьшением геометрических размеров производимых устройств, которые, в свою очередь, определяются параметрами фотолитографического процесса [1]. Ключевую роль на этапе фотолитографии играет используемый фоторезист — светочувствительный материал, наносимый на полупроводниковый материал в целях получения необходимого топологического рисунка для дальнейшего травления. Для создания качественного фоторезиста требуется разработка нескольких компонентов, наибольший интерес из которых представляет фотогенератор кислоты (ФГК).

Фотогенератор кислоты представляет собой органическую соль, которая при облучении светом заданной длины волны разрушается с образованием кислоты, что приводит к изменению природы полимерной матрицы фоторезиста, делая его чувствительным к различного рода проявителям [2]. К ФГК предъявляется ряд требований по физико-химическим характеристикам, определяющим рабочую длину волны фоторезиста, необходимое время облучения, а также качество полученных изображений. С помощью химического дизайна можно управлять различными характеристиками ФГК. В данной работе рассмотрены три триарилсульфониевые соли перфторбутаносульфоновой кислоты, каждая из которых отличается боковым заместителем в фенильном кольце (рис. 1).

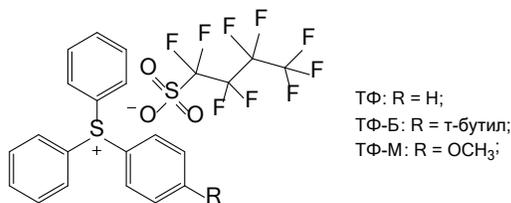


Рис. 1. Структурная формула соединений ТФ, ТФ-Б, ТФ-М

Введение третбутильного заместителя или метокси-группы позволит увеличить растворимость и изменить степень поглощения ФГК, однако это может непредсказуемо повлиять на значение квантового выхода, определяющего эффективность

процесса фотолитографии. Таким образом, важной задачей в процессе разработки ФГК является не только синтез и молекулярный дизайн, но и исследование важных физических характеристик, таких как коэффициент молярной экстинкции и квантовый выход (табл. 1).

Таблица 1. Спектральные характеристики и квантовые выходы ФГК ТФ, ТФ-Б, ТФ-М

Соединение	$\lambda_{\text{макс}}$, нм	λ , нм		Φ , %
		248	максимум	
		ε , $\text{см}^{-1} \text{М}^{-1}$		
ТФ	226	16300	21700	68,1
ТФ-Б	244	39000	41000	51,5
ТФ-М	258	17000	27000	32,1

В данном случае наибольший интерес представляют значения коэффициента молярной экстинкции на длине волны 248 нм, которая соответствует излучению эксимерного лазера KrF, используемого в фотолитографических процессах. Введение заместителя смещает максимум поглощения, приближая его к целевому значению. Однако при положительном влиянии на поглощение введение заместителей снижает квантовый выход, при этом небольшое снижение квантового выхода в случае соединения ТФ-Б компенсируется увеличением степени поглощения более чем в два раза.

Таким образом, соединение ТФ-Б является наиболее перспективным ФГК для технологий с длиной волны 248 нм, что также подчеркивает применимость подхода введения боковых заместителей в качестве инструмента для управления физическими характеристиками ФГК.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № 122111700041-8 (FFSG-2022-0004).

Литература

1. Okoroanyanwu U. Chemistry and lithography. SPIE, 2010.
2. Кузнецова Н.А., Малков Г.В., Грибов Б.Г. Фотохимические генераторы кислоты. Применение и современное состояние разработок // Успехи химии, 2020. — Т. 89. — № 2. — С. 173–190.



УДК 54.057

Синтез производного норборнендикарбоксимида — перспективного фотогенератора кислоты для химически усиленных фоторезистов

Заморецков Д. С., Аккуратов А. В.

ФИЦ ПХФ и МХ РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1

В работе представлена оптимизация синтеза производного норборнендикарбоксимида — перспективного фотогенератора кислоты (ФГК) для изготовления химически усиленных фоторезистов. Важным результатом работы стала новая усовершенствованная методика получения перфторалкансульфонатов норборнендикарбоксимида в виде термодинамически стабильных экзостереоизомеров. Предложенные методы позволяют существенно сократить затраты на получение ФГК, что должно способствовать быстрому появлению на рынке российских фоторезистов для фотолитографии на длине рабочего излучения 248 нм.

Ключевые слова: химически усиленный фоторезист; норборнендикарбоксимид; иммерсионная фотолитография.

В последние годы резко возрастает спрос на отечественные материалы, приборы и технологии для разработки микроэлектроники. На текущий момент важной задачей является получение отечественных фоторезистов, используемых в фотолитографии с длиной волны рабочего излучения 248 нм. Наиболее подходящим ФГК для создания химически усиленного резиста для этого процесса являются производные норборнена [1]. Повышенное внимание к данным материалам обусловлено строением норборнендикарбоксимида. С одной стороны, включение такого объемного блока способствует повышению точки кипения образующейся фотокислоты, в то время как жесткой каркас не позволяет молекуле разрушаться под воздействием сильного ультрафиолетового излучения, а наличие двух карбонильных групп обеспечивает растворимость в полярных растворителях, таких как 2-метоксипропилацетат [2]. Наряду с этим стоимость зарубежных соединений на основе норборнена остается чрезвычайно высокой.

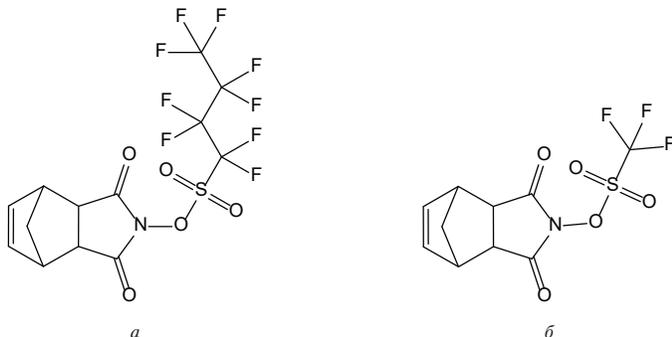


Рис. 1. Перфторбутан- (а) и трифторметансульфонатные (б) производные 5-норборнен-2,3-дикарбоксимида

В этой связи мы поставили задачу по воспроизведению, упрощению и масштабированию синтеза ФГК неионного типа — перфторбутан- и трифторметансульфоната 5-норборнен-2,3-дикарбоксимида (рис. 1).

Вышеупомянутые ФГК обычно получают из *N*-гидрокси-5-норборнен-2,3-дикарбоксимида и соответствующих ангидридов перфторбутан- или трифторметансульфоновой кислот. Дополнительные реагенты (основания и растворители) вносят также большой вклад в стоимость производства продукта, если речь идет о переходе от лабораторных синтезов к полупромышленным масштабам.

Мы предложили для синтеза ФГК применять перфторбутан- и трифторметансульфинилхлориды, которые существенно проще и удобнее в наработке. Более того, нам удалось провести финальную стадию сульфоацилирования с применением в качестве основания дешевого водного раствора поташа. В результате оптимизация большинства стадий синтеза позволила снизить стоимость норборнен-содержащих ФГК в 15 раз.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (122111700041-8).

Литература

1. Feke G. D., Grober R. D., Pohlers G., Moore K., Cameron J.F. On-wafer spectrofluorometric method for determination of relative quantum yields of photoacid generation in chemically amplified resists // *Anal. Chem.*, 2001 Jul 15; 73 (14): 3472-80.
2. Patent № 23911 — CROWELL & MORING LLP INTELLECTUAL PROPERTY GROUP P.O. BOX 14300 WASHINGTON, DC UNITED STATES. Sulfonic acid salt and derivative therefore, photoacid generato. and process for production of sulfonic acid salt: № US8889888B2: application 2009-07-06: publ. 2014-11-18 / Masashi Nagamori Masaki, Fujiwara Kazunori, Mori Satoru Narizuka. 36 p.



УДК 681.513, 621.382

Оценки дозовой ошибки литографической установки по наборам функций плотности распределения размера, получаемым при проходе по дозе

Балан Н. Н.^{1,2}, Васин А. А.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1

Рассматривается метод оценки дозовой ошибки литографического оборудования, основанный на анализе сдвига и ширины функций плотности распределения размера при различных значениях дозы. В работе приведены результаты серии вычислительных экспериментов, показавшие возможность выделения дозовой ошибки оборудования рассмотренным методом.

Ключевые слова: дозовая ошибка литографического оборудования; фотошаблон; функция плотности распределения ошибки.

Внесение каких-либо модификаций в литографический процесс (например замена материалов или узлов установок экспонирования и обработки резиста), как правило, приводит к изменению значений составляющих дозовой ошибки, вносимой на той или иной стадии литографического процесса. Увеличение дозовой ошибки литографического оборудования $EL_{100\%}$ [1, 2] без изменения класса используемого фотошаблона негативно сказывается на качестве формируемой фоторезистивной маски (ФРМ), что делает актуальной задачу практического определения изменившегося значения $EL_{100\%}$. В этом случае становится возможным оценить новые требования к рисунку на фотошаблоне, необходимые для сохранения удовлетворительного качества ФРМ [3].

В докладе предлагается метод оценки $EL_{100\%}$, включающий в себя:

- разработку тестового фотошаблона, организованного по принципу Picked CD [4, 5];
- план практического эксперимента;
- методику анализа результатов пропечатки.

Для определения возможностей предлагаемого метода была проведена серия вычислительных экспериментов, моделирующих литографический перенос периодических тестовых структур с вариацией линейного размера. Для имитации ошибки размера, возникающей в ходе производства ФШ, на тестовые структуры были наложены случайные припуски. Для учета ошибок, вносимых литографическим оборудованием, моделирование проводилось при различных значениях параметров процесса, таких как толщины фоторезиста, экспозиционная доза, положение фокуса и т. п. При проведении эксперимента выполнялся проход по дозе в диапазоне, большем предполагаемого $EL_{100\%}$. Анализ результатов пропечатки экспериментальной выборки, соответствующей определенному разбросу размера, температуры, освещенности и т. д. при разных значениях экспозиционной дозы, позволяет построить набор функций плотности распределения ошибки размера на пластине

и определить значение EL_{tool} как удвоенную разность доз, соответствующих функции, центр которой находится на границе разброса допустимых размеров, и функции, край которой находится на границе разброса допустимых размеров.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Mack C. A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.
3. Балан Н. Н. и др. Система требований к фотошаблонам для проекционной фотолитографии, применяемым в производстве полупроводниковых изделий современных проектных норм // Российский форум «Микроэлектроника-2022», 2022. — С. 142–143.
4. Waelpoel J. A. C., van Schoot J. B. P., Zanzal A. G. Demonstrating next-generation CD uniformity with today's tools and processes // 17th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management / eds. J. A. Reynolds, B. J. Grenon. SPIE, 1997. Vol. 3236. P. 275–283.
5. Kiers T. et al. Reticule error correction for lithography tool qualification benefits and limitations // 20th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology / eds. B. J. Grenon, G. T. Dao. SPIE, 2001. Vol. 4186. P. 217–226.



УДК 543.062, 543.064, 543.421/422

Разработка метода контроля содержания катионов металлов в фоторезистах с химическим усилением, чувствительных к актиничному излучению с длиной волны 248 нм

Кузьмина Е. А.^{1,2}, Джонс М. М.³, Шишляников А. В.^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

³ ООО «Поликетон»

603009, г. Нижний Новгород, ул. Батумская, 7а

Разработана методика измерений массовых долей элементов методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией в пробах фоторезиста, чувствительного к актиничному излучению с длиной волны 248 нм. Представлено краткое описание принципа метода, требования к нему и характеристики.

Ключевые слова: AAS-GFA; фоторезист; атомно-абсорбционная спектроскопия.

В настоящий момент активно ведутся работы по импортозамещению в сфере материалов для микроэлектроники. В частности, данные работы включают создание импортонезависимых материалов для фотолитографии — фоторезистов с химическим усилением и антиотражающих покрытий — в целях создания клонов импортных резистов для применения в производственных процессах микроэлектронных предприятий современного уровня.

Тенденция уменьшения топологических размеров микросхем диктует ужесточение требований к жидким средам, используемым на всех этапах производства микросхем, следовательно, и умение их анализировать с приемлемым уровнем достоверности должно соответствовать допустимым концентрациям (отнесенным к критическим) из примесей металлов в % масс.:

- алюминий	$1,5 \cdot 10^{-6}$
- железо	$2,0 \cdot 10^{-6}$
- магний	$1,5 \cdot 10^{-6}$
- калий	$2,0 \cdot 10^{-6}$
- кальций	$3,0 \cdot 10^{-6}$
- марганец	$1,0 \cdot 10^{-6}$
- натрий	$3,0 \cdot 10^{-6}$
- медь	$1,5 \cdot 10^{-6}$
- молибден	$2,0 \cdot 10^{-6}$
- цинк	$3,0 \cdot 10^{-6}$

При выполнении анализа примесей элементов в диапазонах указанных концентраций (их еще называют ультраследовыми) возникает ряд проблем, одними из которых являются исключение или сведение к минимуму риска загрязнения

пробы и подбор параметров пиролиза и озоления, соответствующих именно фоторезистам с учетом их химического состава.

Разработанный метод основан на измерении поглощения (абсорбции) резонансного излучения нейтральными атомами определенных элементов, образующимися в результате атомизации в графитовой кювете раствора пробы (AAS-GFA). Растворитель и концентрацию раствора подбирали практически, основываясь на показателях абсорбции.

Источником излучения выступают спектральные лампы с полым катодом (ЛПК), установленные в приборе. Свет от ламп пропускается через аналитическую ячейку — кювету (трубку), выполненную из спектрально чистого графита с пиролитически нанесенным графитовым покрытием. В кювету вносится раствор образца с помощью автоматического дозатора — автосамплера. Кювета далее электротермически нагревается в соответствии с заданной программой температурой до полного разложения вещества образца и перехода атомов образца в газообразное состояние в атмосфере инертного газа аргона. Свет от источника поглощается возбужденными атомами пропорционально концентрации искомого элемента — аналита — на выбранной длине волны. Выбор длин волн (резонансных или проминентных линий) осуществляется монохроматором прибора в соответствии с программой анализа аналита.

Для вычисления концентрации искомого аналита предварительно программа осуществляет градуировку (калибровку) с помощью стандартных растворов с известной заданной концентрацией и построением калибровочного графика зависимости измеряемой оптической плотности от концентрации.

Для учета неспецифической (фоновой) абсорбции света ЛПК в приборе применена коррекция фона с помощью эффекта Зеемана — расщепление пика аналита в магнитном поле за счет круговой поляризации и автоматическое вычитание поляризованной компоненты.

Описанный метод измерений используется для контроля разрабатываемого отечественного фоторезиста, проходит аттестацию для получения сертификата. После чего методика будет использована для аттестации фоторезиста при испытаниях на сохраняемость и для выходного и входного контроля.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // *Нано- и микросистемная техника*, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
3. Уэйст К. Использование ламинарных шкафов и боксов для защиты от загрязнений взвешенными в воздухе частицами, CleanAirProducts(USA) // *CleanRooms*, September, 2008.
4. Пупышев А. А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2009. — 784 с. ISBN 978-5-94836-231-1.



УДК 621.382

Использование метода двойного экспонирования со сдвигом маски для улучшения разрешающей способности фотолитографического процесса

Тихонова Е. Д.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

etikhonova@niime.ru

В статье описан способ формирования критического размера линии длиной 45 нм с использованием метода двойного экспонирования со сдвигом маски, позволяющий выйти за пределы разрешения исходного процесса. Были проведены эксперименты по сравнению единичного переэкспонирования и двойного экспонирования.

Ключевые слова: фотолитография; разрешающая способность; двойное паттернирование; двойное экспонирование; фоторезист; шероховатость линии.

В настоящее время в России идет активное внедрение 65-нм техпроцесса. Для дальнейшего освоения 28 нм и более передовых технологий необходимо улучшать разрешение фотолитографического процесса, определяемое критерием Рэлея [1]:

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

где k_1 — технологический коэффициент применяемого фотолитографического процесса, λ — длина волны экспонирующего излучения, NA — числовая апертура используемой оптической установки.

Одним из способов преодоления дифракционного предела является применение методов двойного паттернирования [2, 3]. Однако использование двух фотошаблонов приводит к возникновению ошибки совмещения и к проблеме низкой пропускной способности, в связи с чем актуальным является применение метода двойного экспонирования [3].

В настоящей работе мы используем метод двойного экспонирования со сдвигом маски (Mask Shift Double Exposure, MSDE) для получения линий размером 45 нм. В стандартном процессе фотолитографии профиль фоторезиста создается путем однократного пропускания света через фотошаблон. В нашем случае излучаемая энергия разделяется на две. При сдвиге координат фотошаблона происходит изменение значений суммарной энергии, что позволяет добиться меньших критических размеров (КР).

Сначала мы провели эксперимент, целью которого было убедиться, что если не перемещать координаты фотошаблона и пластины, то при разделении световой энергии на две части с учетом значения пороговой энергии, суммарная доза экспонирования будет линейной комбинацией этих частей, т.е. получившийся массив линий не будет отличаться от исходного. В итоге, сравнив получившиеся профили

линий, нам удалось выяснить, что массив линий формируется одинаково как при одиночном экспонировании, так и при двукратном воздействии, и подобрать оптимальное значение дозы. Возникающий при этом небольшой сдвиг энергии обусловлен эффектом сопротивления временной задержки [3].

Затем мы сравнили двойное экспонирование с переэкспонированием — подачей дозы энергии, превышающей наилучшую, для массива линий размером от 90 до 150 нм. По мере увеличения дозы реакция фотогенератора (ФГК) становилась выше 50 % и начинала распространяться в более непредвиденном направлении, что привело к ухудшению показателя шероховатости линии (Linewidth Roughness, LWR). Метод двойного экспонирования, напротив, продемонстрировал хорошее значение шероховатости линии из-за более узкого диапазона интенсивности света и меньшей избыточной энергии.

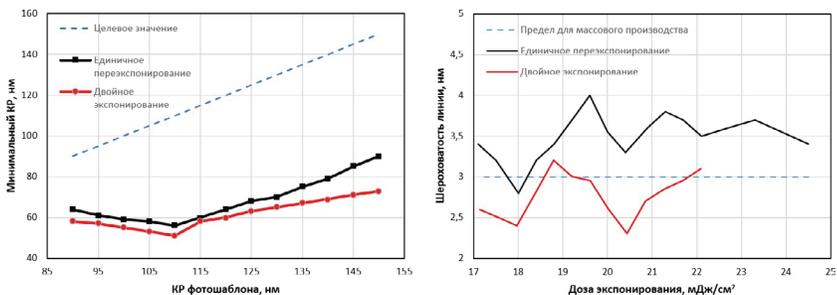


Рис. 1. Сравнение единичного переэкспонирования и двойного экспонирования: графики зависимости предельного критического размера от данного на фотосаблона (слева) и шероховатости линии от дозы экспонирования (справа)

Как показано на рисунке выше, показатели шероховатости линии при использовании двойного экспонирования удовлетворяют требованиям промышленного производства. Однако для применения метода двойного экспонирования со сдвигом маски в производственном процессе необходимо сконструировать более сложный макет маски, способный отображать два (и более) различных шаблона, например, с помощью разделения проектируемого участка на две области.

Таким образом, за однократный процесс фотолитографии возможно будет получить массив линий или более сложные структуры меньших размеров. В дальнейшем можно использовать процесс двойного паттернирования для достижения лучшего разрешения литографического процесса.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. Тихонова Е. Д., Горнев Е. С. Использование материала spin-on-carbon для улучшения метода самосовмещенного двойного паттернирования // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-3 (102). — С. 859–861.
3. Lee S., Byers J., Jen K., Zimmerman P., Rice B., Turro N. J., Willson C. G. An analysis of double exposure lithography options // Proc. SPIE 6924, Optical Microlithography XXI, 2008. Vol. 6924. P. 1–12.



УДК 51-74

Методы расчета припусков на травление при проектировании фотошаблонов

Харченко Е. Л., Уткина А. А.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

ekharchenko@niime.ru, autkina@niime.ru

В работе рассмотрена проблема ухода размеров топологических элементов в процессе травления. Для решения проблемы применено компактное полуэмпирическое моделирование и методы машинного обучения. На основе рассчитанных припусков составлены правила коррекции топологии при проектировании фотошаблонов.

Ключевые слова: вычислительная литография; фотолитография; фотошаблон; травление.

В процессе проектирования фотошаблонов возникает немало задач, их количество и сложность возрастают по мере уменьшения критического размера на пластине [1]. Необходимо не только разместить элементы технологического обрамления, оптимально расставить кристаллы на кадре, но и откорректировать топологическую информацию для учета дифракционных эффектов, возникающих в фотолитографии. Помимо дифракционных эффектов во время экспонирования фоторезиста, также стоит учитывать неточности переноса рисунка в процессе травления слоя под фоторезистивной маской [2]. Сложность заключается в том, что уход размеров неравномерный и зависит от геометрии топологического рисунка.

В целях расчета припусков на травление необходимо спроектировать матрицу периодических тестовых структур. Далее провести измерение структур в результате проявления фоторезистивной маски и после травления слоя под ней. Разница в полученных измерениях показывает припуск, который требуется учитывать при проектировании фотошаблонов. Однако измерить все встречающиеся на практике случаи не представляется возможным, поэтому возникает необходимость в построении соответствующих моделей [3].

В работе рассмотрен подход использования компактных полуэмпирических моделей и моделей на основе машинного обучения для расчета припусков на травление на примере затворного слоя для проектной нормы 28 нм. Исходными данными для моделирования являлись измерения 207 периодических структур, которые разделили на калибровочное и верификационное множества. Сравнение моделей проводилось непосредственно на верификационном множестве. Критерием сравнения являлось среднеквадратическое отклонение смоделированного размера от измеренного на пластине. Модель, показавшая наименьшую ошибку, была взята для определения правил коррекции топологической информации на фотошаблоне.

Литература

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.



2. Granik Y. Correction for etch proximity: new models and applications // Optical Microlithography XIV. SPIE, 2001. Vol. 4346. P. 98–112.
3. Liu Q., Cheng R., Zhang L. Study of model based etch bias retarget for OPC // Optical Microlithography XXIII. SPIE, 2010. Vol. 7640. P. 982–987.



УДК 537.862

Терагерцевый эмиттер на основе Со/Мо с возможностью управления амплитудой и поворотом поляризации ТГц-излучения

Авдеев П. Ю.¹, Лебедева Е. Д.¹, Горбатова А. В.¹, к. ф.-м. н., Климов А. А.¹, Гусев Н. С.², к. ф.-м. н., Бурыakov А. М.¹, д. ф.-м. н., Сапожников М. В.², д. ф.-м. н., Мишина Е. Д.¹

¹ МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

² Институт физики микроструктур РАН
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105
pasha.avdeev.2000@mail.ru

Экспериментально исследован спинтронный эмиттер ТГц-излучения на основе структуры Со (3 нм) / Мо (3 нм). В данном эмиттере показана возможность управления ТГц-генерацией при изменении поляризации оптической накачки. Использование Мо позволило изменять ТГц-амплитуду на 41 % при вращении линейной поляризации накачки. Продемонстрировано управление ТГц-поляризацией на 360° при помощи внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: ТГц-излучение; спинтронные эмиттеры; ТГц-поляризация; управление ТГц-поляризацией; контроль ТГц-амплитуды.

Применение терагерцевого (ТГц) излучения открывает большие перспективы для медицины, визуализации, обеспечения безопасности [1, 2] и т. д. В связи с этим возникает необходимость в высокоэффективных широкополосных ТГц-источниках. На эту роль отлично подходят спинтронные эмиттеры — магнитные металлические наноструктуры, в которых ТГц-генерация происходит в результате спин-зарядовой конверсии, вызванной сверхбыстрыми лазерными импульсами [3]. Наиболее распространенным механизмом преобразования спина в заряд является обратный спиновый эффект Холла (ОСЭХ), который происходит в объеме материала с сильной спин-орбитальной связью [4]. В эмиттерах на основе ОСЭХ-амплитудой и поляризацией ТГц-сигнала можно управлять приложением магнитного поля [5]. Среди спиновых эффектов ТГц-генерации также примечателен обратный эффект Рашбы — Эдельштейна (ОЭРЭ), основанный на спиновом расщеплении электронов на границе материала с нарушенной инверсионной симметрией. В работах [6] и [7] было показано управление амплитудой ТГц-сигнала эллиптически-поляризованной лазерной накачкой. Таким образом, в эмиттерах на основе ОЭРЭ имеется возможность управления ТГц-амплитудой при помощи поляризации возбуждающего излучения, что недостижимо при других механизмах ТГц-генерации.

В своей работе мы сообщаем о спинтронном эмиттере, основанном на ОЭРЭ, с возможностью управления ТГц-амплитудой при помощи поляризации возбуждающего излучения, а также управления ТГц-поляризацией внешним магнитным полем. Использование пленки Мо в качестве немагнитного слоя позволило управлять ТГц-амплитудой посредством поворота линейно-поляризованной накачки.

Исследуемый спинтронный эмиттер на основе структуры Со/Мо был получен методом магнетронного напыления на подложку SiO₂. Толщина слоя кобальта

и молибдена составила 3 нм соответственно. Для формирования одноосной магнитной анизотропии в процессе напыления прикладывалось магнитное поле напряженностью 1500 Э в плоскости образца. С использованием методики продольного магнитооптического эффекта Керра была подтверждена одноосная магнитная анизотропия в плоскости выращенных пленок.

Эксперимент проводился при помощи методики терагерцевой спектроскопии временного разрешения (THz-TDS — terahertz time-domain spectroscopy) в геометрии на пропускание. Подробное описание экспериментальной установки приведено в работе [8].

Показано, что изменение стороны воздействия возбуждающего излучения вызывает изменение фазы ТГц-сигнала на 180 градусов. Это явление связано с изменением направлений спиновой (j_s) и зарядового (j_c) токов, что подтверждает наличие спин-зарядовой конверсии в исследуемом спинтронном эмиттере. Показано, что механизм ТГц-генерации имеет магнитную природу и связан с эффектом Рашбы — Эдельштейна.

Амплитуда ТГц-излучения достигала величины 3,3 кВ/см, а ширина спектра, ограниченная чувствительностью детектирующего кристалла ZnTe, составила 3,0 ТГц.

Показана глубина модуляции 70% при изменении направления магнитного поля, приложенного вдоль оси легкого намагничивания. Амплитуда ТГц-сигнала при намагничивании эмиттера вдоль легкой оси магнитной анизотропии на 32% выше, чем при намагничивании вдоль трудной оси.

Продемонстрировано управление ТГц-амплитудой путем поворота плоскополяризованного возбуждающего излучения. При изменении величины и направления магнитного поля глубина модуляции ТГц-амплитуды составила от 24 до 41%.

Продемонстрировано управление поворотом плоскости ТГц-поляризации в диапазоне от 0 до 360° при приложении к спинтронному эмиттеру магнитного поля напряженностью до ± 200 Э. Была показана возможность точной подстройки ТГц-поляризации в диапазоне от 0 до 360° при приложении магнитного поля различной напряженности вдоль трудной оси намагничивания. При аналогичном намагничивании эмиттера вдоль легкой оси магнитной анизотропии происходило скачкообразное изменение поляризации на 180°.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № 23-19-00849.

Литература

1. Pawar A. Y. et al. Terahertz technology and its applications // Drug Invent. Today, 2013. Vol. 5. № 2. P. 157–163.
2. Гареев Г., Лучинин В. Применение терагерцевого излучения в биологии и медицине // Наноиндустрия, 2014. — № 6. — С. 34–45.
3. Wu W. et al. Principles of spintronic THz emitters // J. Appl. Phys., 2021. Vol. 130. № 9.
4. Seifert T. et al. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation // Nat. Photonics. Nature Publishing Group UK London, 2016. Vol. 10. № 7. P. 483–488.
5. Khusyainov D. et al. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure // Sci. Rep., 2021. Vol. 11. № 1. P. 697.
6. Zhou C. et al. Broadband Terahertz Generation via the Interface Inverse Rashba-Edelstein Effect // Phys. Rev. Lett., 2018. Vol. 121. № 8. P. 086801.



7. Jungfleisch M. B. et al. Control of Terahertz Emission by Ultrafast Spin-Charge Current Conversion at Rashba Interfaces // Phys. Rev. Lett., 2018. Vol. 120. № 20. P. 207207.
8. Buryakov A. M. et al. Efficient Co/Pt THz spintronic emitter with tunable polarization // Appl. Phys. Lett., 2023. Vol. 123. № 8. P. 082404.

УДК 621.3.049

Исследование болометрического отклика Ван-дер-Ваальсова сверхпроводника NbSe₂

Шейн К.¹, Жаркова Е.², Кашенко М. А.², Любчак А.^{1,2}, Нгуен Е.², Семенов А.¹, Гольцман Г. Н.¹, Новоселов К. С.^{4,2}, Чараев И.⁵, Шиллинг А.⁵, Гайдученко И.¹, Бандурин Д. А.⁶

¹ Московский государственный педагогический университет, физический факультет
119435, г. Москва

² Центр нейрофизики и нейроморфных технологий
121205, г. Москва

³ Центр фотоники и двумерных материалов
141700, г. Долгопрудный

⁴ Институт функциональных умных материалов, Национальный университет Сингапура
117575, Сингапур

⁵ Университет Цюриха, Цюрих, Швейцария, 8057

⁶ Факультет материаловедения и инженерии, Национальный университет Сингапура
117575, Сингапур

Продемонстрировано использование сверхпроводников NbSe₂ vdW в качестве ТГц-болометров. Улучшенный интерфейс между NbSe₂-выводами спиральной антенны способствовал уменьшению несоответствия импеданса между NbSe₂ и схемой считывания радиочастотного сигнала, что позволило нам достичь сильного фотоотклика на частотах 0,13 ТГц.

Ключевые слова: болометр на горячих электронах; терагерцевые технологии.

Работа сверхпроводящих болометров на горячих электронах (НЕВ) основана на поглощении падающего ТГц-излучения, которое вызывает повышение электронной температуры, T_e . Это приводит к значительному увеличению сопротивления образца, когда его температура приближается к температуре сверхпроводящего перехода [1].

Наши NbSe₂-устройства (см. вставку на рис. 1а) были изготовлены с использованием метода сухого переноса [2]. Так, устройства состояли из флейков малой ширины (микропроводов) NbSe₂, покрытых тонкими слоями hBN для предотвращения загрязнений и деградации сверхпроводника в процессе электронной литографии, используемой для нанесения электрических контактов. Микропровод NbSe₂ был соединен с золотой спиральной логопериодической антенной, которая была разработана в желаемом диапазоне частот.

Перед измерениями фотоотклика мы охарактеризовали транспортные свойства наших приборов на основе NbSe₂. На рис. 1а показана зависимость сопротивления R_{2pt} от температуры T для одного из них. Микропровод NbSe₂ имеет стандартное металлическое поведение (вставка на рис. 1а) и характеризуется типичным для NbSe₂ отношением остаточного сопротивления ($RRR = 8$) [3]. Температура сверхпроводящего перехода, T_c , микропровода составляла около 6,5 К [4]. В середине



сверхпроводящего перехода $R_{2pt} \approx 50 \Omega$, что совпадает с импедансом схемы радиочастотного считывания и обеспечивает идеальное согласование между $NbSe_2$ и схемой, позволяя исследовать фундаментальные пределы времени отклика в сверхпроводящих НЕБ из $NbSe_2$.

Для проведения измерений фотоотклика устройства были помещены на полусферическую линзу, прикрепленную к холодному пальцу криостата с переменной температурой, оснащенного высокочастотными коаксиальными кабелями. Такая установка вместе с широкополосной антенной позволила проводить измерения при различных T . В схеме мы использовали лампу обратной волны (ЛОБ) с частотой $f = 0,13$ ТГц. Выходное излучение модулировалось с помощью механического прерывателя, вращающегося с частотой 77 Гц, а напряжение отклика ΔV измерялось как функция тока смещения I_{dc} с помощью стандартной методики измерения методом lock-in, синхронизированной с частотой прерывателя. Мощность выходного излучения, P_0 , определялась с помощью калиброванного измерителя мощности или ячейки Голя в зависимости от диапазона мощности. На рис. 1б показаны зависимости ΔV от тока смещения I_{dc} при освещении образца излучением 0,13 ТГц. Наблюдался ярко выраженный пик ΔV вблизи критического тока при заданной температуре T .

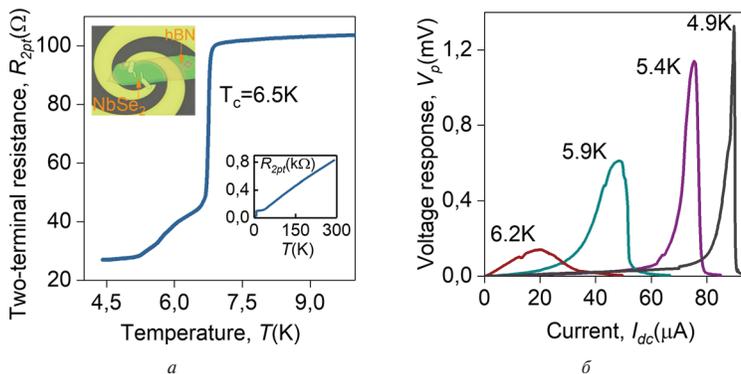


Рис. 1

Литература

1. Gouev Yu. P. et al. Broadband ultrafast superconducting NbN detector for electromagnetic radiation // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75. № 7. P. 3695–3697.
2. Castellanos-Gomez A. et al. Deterministic transfer of two-dimensional materials by all-dry viscoelastic stamping // 2D Mater., 2014. Vol. 1. № 1. P. 011002.
3. Boaknin E. et al. Heat Conduction in the Vortex State of $NbSe_2$: Evidence for Multi-band Superconductivity // Phys. Rev. Lett., 2003. Vol. 90. № 11. P. 117003.
4. Khestanova E. et al. Unusual Suppression of the Superconducting Energy Gap and Critical Temperature in Atomically Thin $NbSe_2$ // Nano Lett., 2018. Vol. 18. № 4. P. 2623–2629.



УДК 537.638.215

Терагерцевая генерация в обменно-смещенной гетероструктуре Co/IrMn

Лебедева Е. Д.¹, Авдеев П. Ю.¹, Горбатова А. В.¹, к. ф.-м. н., Пашенькин И. Ю.², д. ф.-м. н., Сапожников М. В.², к. ф.-м. н., Буряков А. М.¹

¹ МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
caterina.lebedewa2015@yandex.ru

² Институт физики микроструктур РАН

603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105

Настоящая работа посвящена исследованию управления характеристиками ТГц-излучения в спинтронном генераторе на основе Co/IrMn за счет манипулирования обменной связью между слоями ФМ/АФМ. В работе продемонстрировано динамическое управление величинами обменной связи, обменного смещения, коэрцитивных сил, а также направления пиннинга при помощи лазерных импульсов и магнитного поля. Результаты данной работы дадут возможность отказаться от энергозатратных постоянных магнитных полей для управления характеристиками ТГц-излучения, а также позволят расширить область применения ТГц-технологий.

Ключевые слова: ТГц-излучение; обменное смещение; структура ферромагнетик/антиферромагнетик; лазерно-индуцированное управление.

Обратный спиновый эффект Холла (ISHE) является одним из фундаментальных механизмов преобразования спин — заряд в сверхбыстрой спинтронике [1]. Этот эффект заключается в генерации тока поперечного заряда при спиновой накачке ферромагнетика (ФМ) за счет спин-орбитальной связи. Значительное усиление спин-зарядной конверсии может быть достигнуто путем добавления к ФМ тонкого слоя антиферромагнитного материала (АФМ) [2]. В результате обменного взаимодействия между слоями ФМ и АФМ происходит усиление спинового тока. Таким образом, структуры на основе тонких пленок ФМ/АФМ обеспечивают более эффективное преобразование спина в заряд по сравнению с чистыми ФМ, что может быть использовано в различных приложениях спинтроники [3]. Кроме того, АФМ обладает такими свойствами, как устойчивость к внешним магнитным полям и сверхбыстрое спиновое возбуждение. Эти свойства, наряду с возможностью генерации ТГц, позволяют создавать на основе АФМ спинтронные устройства, которые могут превзойти возможности существующих спинтронных устройств на основе ФМ [4]. Однако относительно небольшая чистая намагниченность затрудняет управление магнитными моментами АФМ. Таким образом, поиск эффективных методов манипулирования магнитными моментами АСМ имеет решающее значение для реализации спинтронных устройств на основе АСМ. В данной работе мы исследовали возможность манипулирования величиной обменного смещения в структуре FM/AFM с помощью лазерного нагрева и приложения малых магнитных полей.

FM/AFM-структура была изготовлена на подложке Al₂O₃. Слои Co (3 нм) и IrMn (5 нм) были осаждены с помощью магнетронного распыления. Поверхности активных слоев были защищены тонкими слоями SiO₂. Наличие слоя АСМ помогло



создать одноосную анизотропию в плоскости образца, о чем свидетельствует наличие четко выраженных тяжелой и легкой осей в петлях ТГц-гистерезиса.

С помощью спектроскопии во временной области ТГц были получены зависимости амплитуды ТГц от внешнего магнитного поля (ТГц-Н). Путем локального нагрева слоя АСМ фемтосекундными лазерными импульсами общим числом около 10000 было зарегистрировано магнитное состояние во внешнем магнитном поле. Плотность энергии лазерного излучения составляла 2,1 мДж/см². Для регистрации состояния в плоскости образца было приложено магнитное поле напряженностью около 100 Оэ. Приложение магнитного поля напряженностью около 20 Оэ в направлении, противоположном исходному, демонстрировало переключение состояния намагниченности в исследуемой структуре, характеризующееся возвратом в исходное состояние. Таким образом, наблюдалось три состояния петли гистерезиса — симметричная петля (начальное состояние), а также положительно и отрицательно смещенные петли. Помимо смещения петли относительно оси магнитного поля, наблюдалось увеличение коэрцитивного поля в обменно-неоднородных состояниях. Следующим этапом исследования стало определение природы ТГц-генерации. При изменении знака приложенного магнитного поля наблюдалось изменение фазы ТГц-сигнала, что указывает на спиновую природу ТГц-генерации. Кроме того, были получены временные профили ТГц-сигнала при возбуждении образца со стороны подложки и со стороны пленки. Наблюдалась инверсия фазы сигнала, что указывает на то, что основным механизмом генерации ТГц в данном образце является обратный спиновый эффект Холла.

Таким образом, была продемонстрирована возможность манипулирования направлением обменного смещения в структуре Co/IrMn с помощью магнитных полей порядка 100 Оэ и лазерного нагрева. Исследование поля обменного смещения между слоями материалов FM и AFM проводилось с помощью ТГц-спектроскопии во временной области. Результаты показали наличие трех стабильных состояний намагниченности, характеризующихся сдвигом петли ТГц-гистерезиса. Величина поля смещения в данном случае составляла 76 Оэ. Коэрцитивное поле в обменно-связанных состояниях увеличилось на 49 Оэ. Кроме того, был определен основной механизм генерации ТГц-излучения в этом образце.

Литература

1. Prezioso M. et al. Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors // Nature. Nature Publishing Group UK London, 2015. Vol. 521. № 7550. P. 61–64.
2. Merolla P.A. et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface // Science (80-.). American Association for the Advancement of Science, 2014. Vol. 345. № 6197. P. 668–673.
3. Khoroshilov A. L. et al. Hall Effect in the Antiferromagnetic State of Ho₀. 8Lu₀. 2B12 // JETP Lett. Springer, 2022. Vol. 115. № 3. P. 130–135.
4. Jungwirth T. et al. The multiple directions of antiferromagnetic spintronics // Nat. Phys. Nature Publishing Group UK London, 2018. Vol. 14. № 3. P. 200–203.



УДК 621.382

Механизмы радиационной деградации пробивного напряжения p - n -переходов мощных МОП-транзисторов с различными структурами

Арзамасцева Д. М., Петров А. С., Таперо К. И.

АО «Научно-исследовательский институт приборов»

140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8

DMArzasceva@niipribor.ru

Исследовано влияние гамма-облучения на пробивное напряжение p - n -переходов мощных вертикальных МОПТ (VDMOSFET) и КНИ МОПТ с боковой диффузией (SOI LDMOSFET). Для VDMOSFET деградация пробивного напряжения связана с паразитной структурой, в SOI LDMOSFET изменяется концентрация носителей в области дрейфа.

Ключевые слова: мощные МОП-транзисторы; радиационные эффекты; напряжение пробоя p - n -переходов.

Благодаря возможности работы при больших токах (до 70 А) и высоких напряжениях (до 1000 В) мощные МОП-транзисторы стали неотъемлемой частью источников тока, схем коммутации и распределения электропитания и другой критически важной аппаратуры. Такая аппаратура часто используется в условиях воздействия ионизирующего излучения (ИИ), например, для обеспечения работы ядерных энергетических установок. Таким образом, исследования влияния радиационного облучения на изменение пробивного напряжения p - n -переходов мощных МОП-транзисторов становятся все более актуальными. Однако физические механизмы, ответственные за изменение напряжения пробоя перехода сток-исток VDMOSFET (vertical diffused MOSFET) и SOI LDMOSFET (silicon-on-insulator lateral double-diffused MOSFET), не были до конца изучены. Цель данной работы — проанализировать эти физические механизмы.

В работе [1] был исследован эффект увеличения пробивного напряжения сток-исток после воздействия гамма-излучения на мощные n -МОПТ IRFR4615PbF и IRFR3710ZPbF, изготовленные по технологии HEXFET. Структура HEXFET — это размещенные в одном кристалле тысячи параллельно включенных VDMOSFET, образующих шестиугольник. Ток каждого транзистора вносит вклад в общий ток структуры ввиду ее вертикальности. В каждом VDMOSFET выделяют четыре области [2]: n^+ — сильнолегированная область истока, p — область подложки, n^- — слаболегированная область дрейфа в стоке, p^+ — сильнолегированная область стока (рис. 1).

В данной структуре велика вероятность включения «паразитного» биполярного транзистора p^+ - p - n^- . Для подавления этого эффекта обычно соединяют эмиттер и базу «паразитного» транзистора металлическим электродом истока на поверхности транзистора, однако подача высокого напряжения с быстрой скоростью нарастания (как при ЭСП в [1]) приводит к включению этой структуры. Радиационное облучение вызывает деградацию коэффициента усиления «паразитного» транзистора, вследствие чего пробивное напряжение сток-исток повышается.

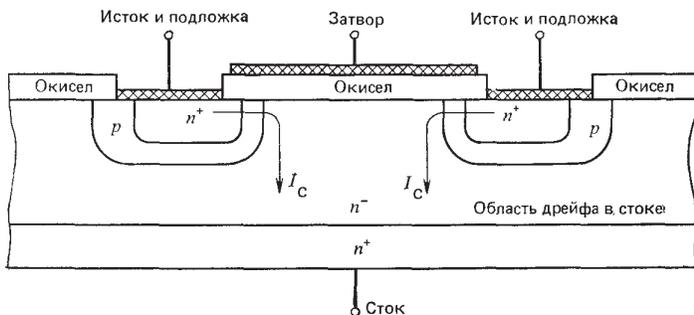


Рис. 1. Поперечное сечение структуры вертикального VDMOSFET [2]

Для SOI LDMOSFET механизм изменения пробивного напряжения вследствие воздействия ИИ иной. ИИ вызывает генерацию электрон-дырочных (e-h) пар в оксиде МОП-структур. Электроны удаляются из оксида за время около пикосекунды, поскольку имеется поперечное электрическое поле. Некоторые e-h-пары успевают прорекомбинировать, но большая часть дырок, вследствие меньшей по сравнению с электронами подвижности, захватывается на локализованные в оксиде состояния (уже имеющиеся до облучения). Таким образом, в объеме скрытого и полевого оксидов (BOX и FOX соответственно) накапливается положительный заряд (рис. 2). Поскольку BOX гораздо толще FOX, в нем накопится больше заряда за одно и то же время облучения. Накопление положительного заряда в оксиде вызывает образование инверсного слоя в области дрейфа, который соединяет области стока и истока.

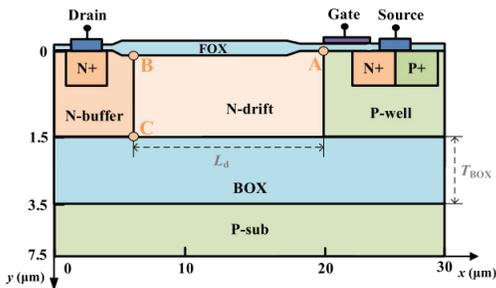


Рис. 2. Структура SOI LDMOSFET

Структуры SOI LDMOSFET имеют длинную слегка легированную область дрейфа n-типа, и именно эта область определяет напряжение пробоя. Зависимость пробивного напряжения сток-исток от уровня легирования этой области показана на рис. 3. По механизму, описанному выше, воздействие ИИ изменяет концентрацию носителей в дрейфовой области, что приводит к изменению пробивного напряжения сток-исток.

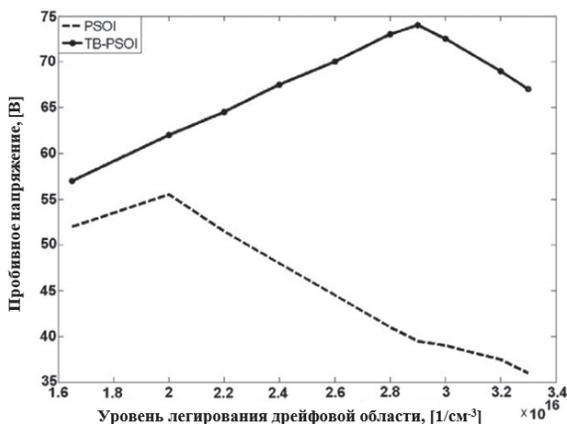


Рис. 3. Зависимость пробивного напряжения сток-исток SOI LDMOSFET от уровня легирования дрейфовой области [3]

Таким образом, воздействие ИИ может как увеличивать, так и уменьшать пробивное напряжение сток-исток мощных МОПТ в зависимости от особенностей структуры конкретного транзистора.

Литература

1. Арзамасцева Д. М., Петров А. С., Таперо К. И. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2023. — № 3. — С. 19–22.
2. Окснер Э. С. Мощные полевые транзисторы и их применение: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1985.
3. Saremi M. et al. A partial-SOI LDMOSFET with triangular buried-oxide for breakdown voltage improvement // Microelectronics Reliability, 2011. P. 1–8.



УДК 621.382:621.315.592.3

Диагностика вызванных тяжелыми заряженными частицами повреждений МОП-структур с помощью импедансной и DLTS-спектроскопии

Горбачук Н. И.¹, Поклонский Н. А.¹, Ермакова Е. А.¹, Шпаковский С. В.²¹ Белорусский государственный университет220030, Республика Беларусь, г. Минск, просп. Независимости, 4
gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com² ОАО «Интеграл»

220108, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Казинца, 121А

shpaks@tut.by

Исследовались структуры Al/SiO₂/n-Si, облученные ионами He с энергией 5 МэВ флюенсом 10¹⁰–10¹² см⁻². Показана возможность регистрации методом спектроскопии DLTS поверхностных состояний на границе SiO₂/n-Si. С помощью импедансной спектроскопии продемонстрировано формирование квазисплошного нарушенного слоя.

Ключевые слова: МОП-структуры; кремний; радиационные дефекты; DLTS; импедансная спектроскопия.

Структуры металл — диэлектрик — полупроводник или металл — оксид — полупроводник (МДП или МОП) являются базовыми для современных технологий микро- и нанoeлектроники. Необходимость разработки изделий электроники, устойчивых к воздействию ионизирующих излучений и к облучению тяжелыми заряженными частицами, требует развития методов диагностики. Традиционно для исследования радиационных повреждений МОП-структур применяются методы емкостной спектроскопии [1]. Наличие ловушек для носителей заряда на границе раздела оксид — полупроводник и компенсация легирующих примесей радиационными дефектами осложняет анализ результатов измерений. Это связано с появлением дополнительной зависимости емкости и от частоты переменного тока, и от напряжения смещения вследствие перезарядки поверхностных состояний и наличия дополнительных электрических потерь в компенсированном кремнии. Применение методов импедансной спектроскопии для исследования подобных структур может дать дополнительную информацию [2, 3]. Спектроскопия DLTS, как правило, используется для контроля барьеров Шоттки и *p-n*-структур [4]. В исследовании же МОП-структур она применяется пока не столь успешно. Цель работы — продемонстрировать возможность комбинированного применения DLTS и импедансной спектроскопии в диагностике радиационных повреждений структур Al/SiO₂/n-Si.

Структуры Al/SiO₂/n-Si изготавливались на пластинах (100) монокристаллического кремния КЭФ-4,5, выращенного методом Чохральского. Слой SiO₂ толщиной 420 нм формировался термическим окислением. На планарную сторону поверх слоя SiO₂ термическим напылением наносился алюминий. Площадь металлизации толщиной 0,7 мкм составляла 1,85×1,85 мм². Контакты к непланарной стороне также формировались напылением Al. Со стороны Al/SiO₂ структуры облучались ионами гелия (энергия 5 МэВ, средний проективный пробег ≈ 24 мкм). Облучение проводилось при комнатной температуре. Флюенс варьировался от 10¹⁰ до 10¹² см⁻².

Установлено, что дисперсия электрической емкости в режиме сильной инверсии определяется генерационно-рекомбинационными процессами, протекающими в области пространственного заряда; в режиме обеднения дисперсия в основном обусловлена перезарядкой поверхностных состояний. Наличие радиационно компенсированного слоя кремния существенно сказывается на дисперсии электрической емкости при флюенсе облучения 10^{12} см⁻² и проявляется даже в режиме обогащения. Расчет плотности поверхностных состояний в облученных структурах, проведенный по данным измерений вольт-фарадных характеристик, показывает наличие двух максимумов: в окрестности $E_c - 0,1$ эВ и $E_c - 0,4$ эВ. Установлено, что варьирование напряжения заполнения и напряжения эмиссии позволяет независимо регистрировать сигналы DLTS от центров, локализованных на границе раздела SiO₂/n-Si, и от радиационных дефектов в глубине кремния, при этом максимум на спектре DLTS, определяемый поверхностными состояниями, расположен при $E = 0,4 \pm 0,05$ эВ.

Литература

1. Nicollan E. H., Goetzberger A. The Si-SiO₂ interface electrical properties as determined by metal-insulator-silicon conductance technique // The Bell System Technical Journal, 1967. Vol. XLVI. № 6. P. 1055–1133.
2. Impedance spectroscopy: theory, experimen. and applications / Eds. E. Barsoukov, J. R. Macdonald. Hoboken: Wiley, 2005. 595 p.
3. Vitanov P., Ivanova K., Harizanova A. Investigation of thin film of metal oxides on silicon with impedance spectroscopy // Vacuum, 2004. Vol. 76. № 2–3. P. 207–210.
4. Lang D. V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // Journal of Applied Physics, 1974. Vol. 45. № 7. P. 3023–3032.



УДК 621.382

Способ мониторинга порогового напряжения МОП-транзисторов в широком временном интервале после воздействия импульса ионизирующего излучения

Земцов А. Э., Петров А. С., Таперо К. И.

АО «Научно-исследовательский институт приборов»

140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8

m1705366@edu.misis.ru

Представлен метод определения порогового напряжения МОП-транзисторов посредством импульсного изменения смещения на затворе и снятия сток-затворной характеристики.

Ключевые слова: МОП-транзисторы; пороговое напряжение; сток-затворная характеристика; ионизирующее излучение.

Сдвиг порогового напряжения (V_{th}) МОПТ является основным индикатором накопления и релаксации заряда в подзатворном оксиде. Измерение данного параметра транзисторов при воздействии импульсного ионизирующего излучения (ИИИ) затруднено протеканием ионизационных токов в исследуемых структурах. Кроме того, в подобных экспериментах стандартные методы регистрации V_{th} могут искажать результаты исследований, так как изменение электрического режима в процессе и непосредственно после облучения влияет на значение таких параметров, как выход заряда, время переноса дырок и сечение их захвата на оксидные ловушки [1, 2]. Целью данной работы являлась разработка и апробация способа мониторинга V_{th} МОПТ с учетом указанных выше аспектов.

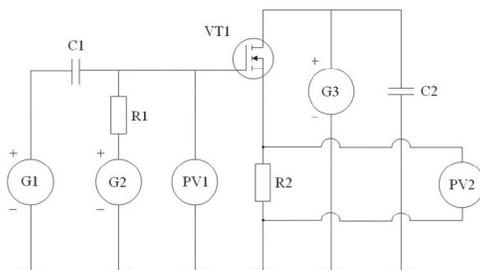
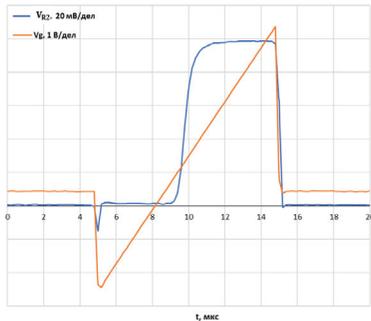


Рис. 1. Схема измерения порогового напряжения п-канального МОПТ после воздействия ИИИ

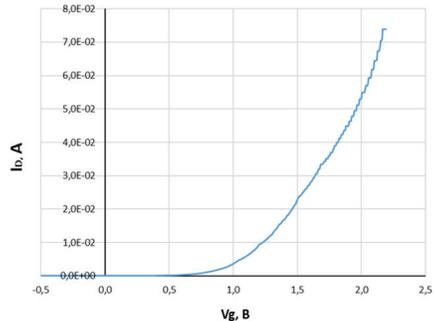
Схема измерения V_{th} п-канальных МОПТ представлена на рис. 1. Источники напряжения G2 и G3 включаются до начала облучения. G2 обеспечивает постоянное значение электрического поля в подзатворном оксиде исследуемой структуры и его направленность к границе раздела сред Si/SiO₂ до, в процессе и после воздействия ИИИ. С помощью G3 на сток МОПТ подается постоянное напряжение порядка 0,1 В, при котором транзистор работает в линейном режиме. Генератор G1 служит для подачи на затвор МОПТ короткого измерительного сигнала с высокой длительностью нарастания ($t_{\text{сигнала}} \approx t_{\text{нарастания}} = 10$ мкс), форма которого соответствует кривой V_g на рис. 2а.

Включение генератора по необходимому временному закону может осуществляться внешней системой запуска или посредством внесения данных в интерфейс программы прибора. Осциллографом PV1 контролируется напряжение на затворе транзистора, а осциллографом PV2 регистрируется напряжение на токосъемном резисторе R2. Для записи данных об относительно редких изменениях напряжения осциллографы работают в режиме сегментирования памяти.

Для определения минимального (V_{G1min}) и максимального (V_{G1max}) значений напряжения сигнала генератора и номинала токосъемного резистора R2 предварительно до облучения производится измерение V_{th} стандартными методами. В данной работе использовался встроенный тест прецизионного параметрического анализатора Keysight B2902A. Параметры измерительного сигнала должны соответствовать условию $V_{G1min} < (V_{th0} - \Delta V_{th}) < V_{G1max}$, а номинал R2 выбирается таким, что ток ограничения превышает ток стока при $Vg = V_{th}$.



а



б

Рис. 2. Общий вид сигнала с токосъемного резистора (V_{R2}) и затвора МОП-транзистора (Vg) (а) и часть сток-затворной характеристики с учетом поправки на изменения напряжения V_{DS}

На рис. 2а приведен общий вид осциллограмм, полученных с помощью представленного метода на образцах n-канальных МОПТ типа BS170 при $V_{G2} = 0,5$ В, $V_{G3} = 0,1$ В, $R2 = 50$ Ом. Измеряемое на токосъемном резисторе напряжение пересчитывалось в ток стока транзистора с учетом изменения напряжения V_{DS} , обусловленного последовательным с каналом сопротивлением:

$$I_D = \frac{V_{R2}/R}{1 - V_{R2}/V_{G3}}, \quad (1)$$

где V_{R2} — падение напряжения на токосъемном резисторе R2; R — сопротивление резистора R2.

На рис. 2б представлена итоговая сток-затворная характеристика транзистора BS170 с учетом описанной выше поправки в расчете I_D . Проведя касательную к зависимости $I_D(Vg)$ через точку, соответствующую максимальному значению крутизны МОПТ, можно определить величину V_{th} в момент измерения сток-затворной характеристики. Серия таких измерений через различные интервалы времени после ИИИ позволяет отследить изменение V_{th} транзистора, обусловленное релаксацией заряда в подзатворном оксиде. Альтернативным способом обработки результатов



подобного эксперимента может служить определение по зависимостям $I_D(V_g)$ значения V_g при фиксированной величине I_D .

Литература

1. Boesch H. E., McGarrity J. M., McLean F. B. Temperature- and field-dependent charge relaxation in SiO_2 gate insulators // IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978. Vol. NS-25. № 3.
2. Ausman G. A. Field Dependence of Geminate Recombination in a Dielectric Medium, DTIC ADA179671, 1987.



УДК 537.9

Влияние толщины слоя $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ и степени электротренировки на время хранения состояния элемента сегнетоэлектрической памяти

Парочкин А. В., Савичев И. А., Савельева Е. О., Чуприк А. А.

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)*

*117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1
chouprik.aa@mipt.ru*

Исследовано влияние толщины слоя $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ и длительности электротренировки на эффект «пробуждения» и время хранения состояния в структурах $\text{W}/\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2/\text{TiN}$. Продемонстрирован подход к сохранению высокой остаточной поляризации ($2Pr = 40$ мкКл/см²) при масштабировании толщины (5–8 нм).

Ключевые слова: энергонезависимая память; время хранения состояния; оксид гафния.

Разработка нового поколения высокоплотной энергонезависимой памяти требует использования нанометровых сегнетоэлектрических пленок. Наиболее перспективными кандидатами являются поликристаллические легированные пленки оксида гафния, поскольку они идеально совместимы с кремниевой технологией, обладают большой остаточной поляризацией и малым коэциктивным напряжением [1]. Однако остаточная поляризация пленок HfO_2 снижается при уменьшении их толщины до нескольких нанометров [2]. Поэтому актуальными задачами являются разработка научно-технологических подходов изготовления сверхтонких сегнетоэлектрических пленок с высокой остаточной поляризацией, измерение характеристик ячеек памяти на их основе и изучение физических механизмов влияния параметров пленок на характеристики.

Основным недостатком сегнетоэлектрической памяти является ограниченное время хранения состояния, что связано с внутренним свойством сегнетоэлектрика — существованием в нем электрического поля, создаваемого зарядами спонтанной поляризации и неидеальностью его экранировки зарядами в электродах. Поле спонтанной поляризации приводит к пространственному перераспределению мобильного заряда в сегнетоэлектрической пленке, который, в свою очередь, создает внутреннее паразитное поле. При считывании информации оно складывается с приложенным полем, в результате чего суммарное поле в сегнетоэлектрике оказывается меньше приложенного, часть доменов не переключается, что приводит к ошибке считывания информации.

В данной работе представлены результаты исследования влияния толщины и процесса электротренировки на время хранения состояния сегнетоэлектрических конденсаторов на основе структуры $\text{W}/\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2/\text{TiN}$ с толщиной слоя $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ 5, 6 и 8 нм. Одной из причин уменьшения остаточной поляризации с толщиной является так называемый эффект пробуждения, длительность которого тем больше, чем тоньше пленка. Эффект пробуждения заключается в постепенном увеличении остаточной поляризации на начальном этапе работы ячейки



памяти и происходит во время процедуры электротренировки, заключающейся в приложении серии биполярных импульсов. В свежеприготовленных структурах остаточная поляризация мала, поскольку полярная ось зерен сегнетоэлектрической фазы преимущественно ориентирована в плоскости пленки, а в процессе электротренировки она поворачивается и становится более вертикальной, то есть происходят необратимые ферроупругие переключения [3].

Параметры электротренировки были подобраны таким образом, чтобы во всех типах структур сегнетоэлектрик находился в электрическом поле одинаковой напряженности и частоты; при этом электротренировка не вызывала пробой структуры и увеличение паразитного тока утечки, но в то же время приводила к одинаковой величине остаточной поляризации. Установлено, что с уменьшением толщины слоя $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ и при неизменной длительности электротренировки снижается время хранения состояния элементом памяти; с уменьшением слоя и при одинаковой степени поляризации снижается время хранения состояния; с уменьшением длительности электротренировки и при неизменной толщине слоя возрастает время хранения состояния. Последнее обусловлено меньшей величиной поля спонтанной поляризации в структурах, подвергшихся слабой электротренировке вследствие более горизонтально ориентированной полярной оси. Снижение времени хранения состояния с уменьшением толщины связано с большей величиной встроенного электрического поля. Действительно, при одинаковой величине паразитного удельного заряда напряженность создаваемого им электрического поля увеличивается с ростом толщины диэлектрического слоя конденсатора.

Представленные экспериментальные результаты могут быть полезны для разработки научно-технологических основ инженерии материалов в области энерго-независимой памяти на основе тонких пленок оксида гафния.

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования МФТИ при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00370, <https://rscf.ru/project/20-19-00370>).



УДК 621.31

Адаптация метода кусочной аппроксимации для оценки времени хранения логических состояний ячеек памяти FeRAM с учетом эффекта импринта

Быковский К. С., Захаров П. С., Скворцов Е. Б., Константинов В. С.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Разработаны принципы метода кусочной аппроксимации деградационных зависимостей. В рамках адаптации метода к ячейкам памяти FeRAM подтверждена гипотеза о зависимости скорости деградации от количества заряда импринта.

Ключевые слова: метод кусочной аппроксимации; FeRAM; адаптация; импринт.

Развитие микроэлектроники столкнулось с ежегодным повышением сложности задач, для решения которых нужны устройства, способные безотказно выдавать необходимые потребителю характеристики. Энергонезависимая память является одним из базовых компонентов этих систем и обладает следующими основными характеристиками: время хранения, ресурс, объем, быстродействие, энергоэффективность и стойкость [1]. В настоящее время активно разрабатываются устройства памяти FeRAM, которые должны соответствовать типовым требованиям по времени хранения логического состояния, а именно не менее 10 лет при температуре 85°C.

На сегодняшний день известны методы оценки длительности хранения логических состояний на основе проведения ускоренных испытаний при повышенных температурах. Такие методы предполагают использование уравнения Аррениуса с проведением эксперимента за пределами диапазона рабочих температур и последующей экстраполяцией в область более низких температур.

Существующие методы имеют следующие недостатки:

- 1) энергия активации может зависеть от температуры;
- 2) не все процессы деградации подчиняются уравнению Аррениуса.

Поэтому в [2] был представлен метод кусочной аппроксимации деградационных зависимостей, который является разновидностью метода прямых наблюдений, ускоренных за счет разбиения деградационного процесса на этапы и одновременного наблюдения за каждым из них. Метод не предполагает экстраполяции по температуре, поэтому лишен недостатков, присущих методам на основе уравнения Аррениуса.

В процессе адаптации метода к ячейкам памяти FeRAM подтверждена гипотеза о зависимости скорости деградации от количества заряда импринта и установлено, что по мере накопления заряда импринта скорость его накопления уменьшается.

В результате адаптации с учетом эффекта импринта построена синтезированная деградационная кривая на основе метода кусочной аппроксимации и проведено сравнение с кривой естественной деградации, которое показало, что синтезированная кривая имеет погрешность на уровне 18% относительно естественной



деградационной кривой при проведении эксперимента длительностью 1 час при температуре 125°C.

Литература

1. Красников Г. Я., Шелепин Н. А. Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // Проектирование систем на кристалле: тенденции развития и проблемы: Тезисы докладов, Москва—Зеленоград, 19–21 октября 2010 года. — Москва—Зеленоград: МИЭТ, 2010. — С. 55.
2. Скворцов Е. Б., Быковский К. С., Захаров П. С., Константинов В. С. Метод оценки времени хранения ячейки памяти FERAM на основе кусочной аппроксимации деградационных зависимостей // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024): Сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА, Москва, 12–16 апреля 2024 года. — М.: МИРЭА — Российский технологический университет, 2024. — С. 579–585.

УДК 621.382.2/3

Исследование электрофизических параметров памяти EEPROM, изготовленной с использованием импортозамещенных материалов

Резник А. А.^{1,2,3}, Морозов Е. Н.¹, Ашанин М. Е.¹¹АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

²АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

³Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

reznik.aa@phystech.edu

Проведены электрические измерения микросхем памяти EEPROM, изготовленные по технологии 90 нм (в составе техпроцесса 180 нм), с использованием импортозамещенных материалов. Тесты на деградацию при различных температурах показывают, что основные характеристики микросхем находятся в пределах допустимых значений.

Ключевые слова: энергонезависимая память; EEPROM; пороговое напряжение; деградация.

Несмотря на активную разработку как в России, так и за рубежом новых видов энергонезависимой памяти, таких как сегнетоэлектрическая (FeRAM), резистивная (ReRAM), магниторезистивная (MRAM) и другие, память на транзисторах с плавающим затвором, к которой относятся Flash и EEPROM, до сих пор находит широкое применение в номенклатуре электронных устройств [1]. Хотя перспективные виды энергонезависимой памяти и могут значительно превосходить EEPROM по ключевым характеристикам, таким как количество циклов перезаписи, напряжение переключения, скорость работы и другие [2], но в то же время технология производства транзисторов с плавающим затвором лучше отработана, а физические процессы, протекающие во время работы ячейки памяти, например заброс «горячих» электронов в область плавающего затвора, достаточно хорошо изучены.

Новые виды энергонезависимой памяти на данный момент находят применение в сценариях, где не требуется большой объем хранимой информации, например в памяти для микроконтроллеров или микросхемах специального назначения, обладающих радиационной стойкостью [3]. Микросхемы памяти EEPROM в России используются для создания загранпаспортов нового образца, транспортных карт, RFID-меток и другой продукции, для которой характеристики перспективных видов памяти могут быть избыточны.

Начиная с 2022 года на зеленоградском заводе «Микрон» начался выпуск микросхем, в том числе и EEPROM по технологии 180 нм, с использованием импортозамещенных материалов. В частности, используются новые фоторезисты (ФР). Такие материалы имеют немного другие физико-химические характеристики, что приводит к изменению геометрии структур во время производства из-за отлаженного технологического процесса с использованием материалов с конкретными свойствами. Чтобы не допустить изменения электрических характеристик



микросхем памяти EEPROM, используются корректировки технологического процесса: например, по новым ФР применялись следующие действия: изменение толщин ФР, корректировка температур сушки ФР, добавление при проявлении т. н. двойной «лужи» (Double puddle), по сути двойного проявления. Все эти действия выполнялись в целях достижения требуемых значений по линейным размерам (Critical Dimension, CD) для каждого конкретного слоя/фоторезиста.

Контроль электрических параметров микросхем памяти EEPROM, выполненной по технологии 90 нм (в составе техпроцесса 180 нм), производится на тестовых структурах при помощи зондовых измерений. Оценка ресурса переключений и пороговых напряжений сформированных структур проводилась с помощью зондовой системы Cascade Summit 12000B-AP с полупроводниковым анализатором параметров Agilent B1500A. Для оценки деградации микросхем памяти измерения проводятся при различных повышенных температурах вплоть до 125°C. В результате проведенных измерений строится зависимость порогового напряжения ячеек памяти от количества циклов переключений, как это изображено на рис. 1.

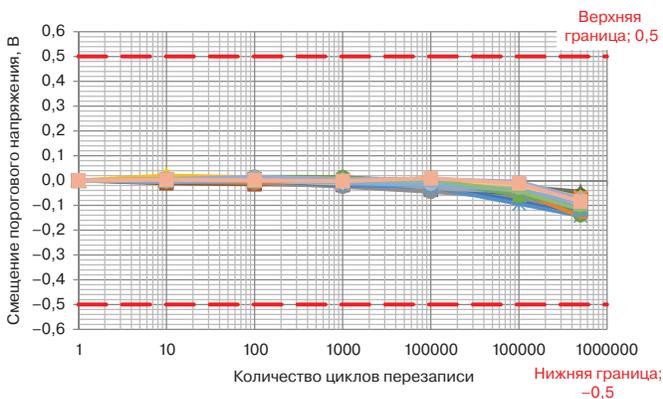


Рис. 1. Зависимость смещения порогового напряжения ячеек памяти EEPROM от количества циклов переключений при комнатной температуре

В результате проведения 500 тысяч циклов перезаписи ячеек памяти EEPROM были получены зависимости порогового напряжения, а также данные об энергии активации. Параметры измеряемых структур находятся в границах спецификации.

Литература

1. Красников Г. Я., Шелепин Н. А. Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // Проектирование систем на кристалле: тенденции развития и проблемы, 2010. — С. 55–55.
2. Zyuzin S. S. et al. Computer Modeling of Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of HfO_2 and ZrO_2 // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № Suppl 1. P. S184–S193.
3. Красников Г. Я., Мещанов В. Д., Шелепин Н. А. Семейство микросхем ПЗУ информационной емкостью 4–64 Мбит для космических приложений // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2015. — № 2 (158). — С. 4–10.



УДК 537.312.7

Элементы энергонезависимой резистивной памяти на основе человеческой крови

Клюкина Е. В.^{1,3}, Ванькаев А. С.^{1,2}, к. ф.-м. н., Ковешников С. В.¹

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
skoveshnikov@iptm.ru*

² *МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
s.vankaev14@gmail.com*

³ *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
katerina-klyukina@mail.ru*

В данной работе проведены исследования электрических характеристик человеческой крови. Наблюдалось резистивное переключение в вертикальном электрическом поле. Проведены исследования влияния облучения ультрафиолетом на проводимость крови в горизонтальном электрическом поле.

Ключевые слова: резистивное переключение; человеческая кровь; воздействие ультрафиолета; биомемристор; резистивная память.

В настоящее время необходим активный поиск новых материалов, пригодных для выполнения функций искусственных синапсов для нейроморфных вычислений. Элементы резистивной памяти на основе биологических материалов могут быть использованы для решения этой задачи [1]. Результаты многих исследований показывают наличие резистивного переключения в биологических материалах, таких как белки, ферменты, полисахариды [2].

В рамках работы необходимо было подготовить образцы для исследования в вертикальном электрическом поле. Кровь была разделена методом центрифугирования на две фракции: плазму и форменные элементы. После этого было подготовлено три вида образцов: плазма крови, форменные элементы крови и неразделенная кровь. Каждый образец был нанесен на металлическую подложку, которая выступала нижним электродом. Верхним электродом выступала металлическая игла, опущенная в образец. Толщина слоя крови составила 50–100 нм. Далее проводились измерения электрических характеристик образцов.

На образцах с плазмой крови и форменными элементами эффекта резистивного переключения не наблюдалось. При исследовании образцов с неразделенной кровью были получены вольт-амперные характеристики, которые демонстрируют классическое биполярное резистивное переключение.

На следующем этапе проводилось исследование влияния коротковолнового ультрафиолетового облучения на проводимость крови в горизонтальном электрическом поле. Длина волны облучения составляла 253 нм. По результатам исследований было обнаружено, что проводимость форменных элементов крови и плазмы не изменялась при облучении ультрафиолетом, в то время как значения проводимости неразделенной крови увеличивались от 3 до 100 раз. Необходимо отметить,



что облучение с большей длиной волны вплоть до видимого света не приводило к изменению проводимости.

Для изучения механизмов резистивного переключения необходимы дальнейшие исследования.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- 1) по итогам исследований было обнаружено, что человеческая кровь обладает эффектом резистивного переключения;
- 2) обнаружено, что человеческая кровь при облучении в коротковолновом диапазоне приводит к изменению проводимости, что может использоваться для изготовления солнечного «слепого» детектора.

Литература

1. Niloufar R. H., Lee J. S. Resistive switching memory using biomaterials // Journal of Electroceramics, 2017. Vol. 39. P. 223–238.
2. Wang H. et al. Resistive switching memory devices based on proteins // Adv. Mater., 2015. 27 (46). P. 7670–7676.

УДК 681.586.74

Исследование газочувствительных характеристик пленок нанокомпозитов на основе различных полимерных матриц с добавлением углеродных нанотрубок

Горшкова А. С., Павлова А. С.

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С. П. Королева

443086, г. Самара, Московское ш., 34

asmoskal@yandex.ru

В данной работе исследовались методы формирования пленок нанокомпозитов на основе силиконовой резины, фотополимерной смолы с добавлением углеродных нанотрубок и применение данных структур для детектирования газа NO_2 .

Ключевые слова: углеродные нанотрубки (УНТ); газовые сенсоры; полимерные нанокомпозиты.

Цель исследования заключалась в проверке возможности использования данных матриц для улучшения гидрофобных свойств чувствительного слоя, а также для увеличения влагостойкости материала. В качестве метода формирования чувствительного элемента сенсоров было предложено использовать метод центрифугирования для получения равномерного пленочного покрытия [1].

Общая методика изготовления нанокомпозитов заключалась в следующем: производится обработка УНТ в полимерной матрице с помощью агатовой ступки для обеспечения равномерного распределения. Далее проводится нанесение пленки на поверхность стекла с помощью центрифугирования. Затем в случае силиконовой резины субстанция переносится методом штампа на поверхность заранее подготовленной полимеризованной силиконовой резины для полимеризации (ввиду недостаточного количества активных центров и сниженной вязкости субстанции), а в случае с фотополимерной смолой образец подвергается УФ-облучению.

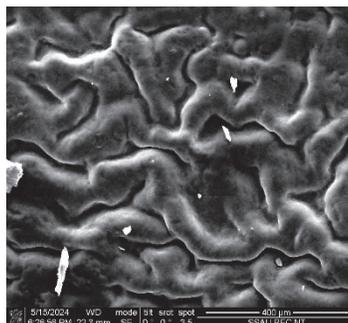
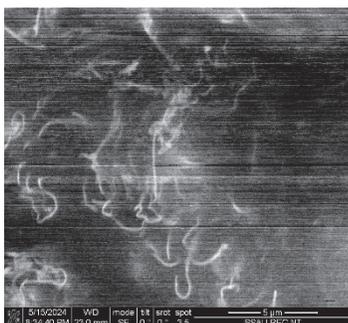


Рис. 1. Фотографии нанокомпозитов УНТ в силиконовой (слева) и фотополимерной (справа) матрицах, выполненные с помощью сканирующей электронной микроскопии



Для исследования газочувствительных характеристик образцы были проверены в диапазоне концентраций 20–70 ppm для газа NO_2 .

Для сенсоров на основе силиконовой резины было исследовано восстановление сенсора без и с применением УФ-излучения. Применение УФ-излучения для восстановления сенсора на фотополимерной матрице оказалось неэффективно, поскольку фотополимерная матрица чувствительна к УФ-излучению.

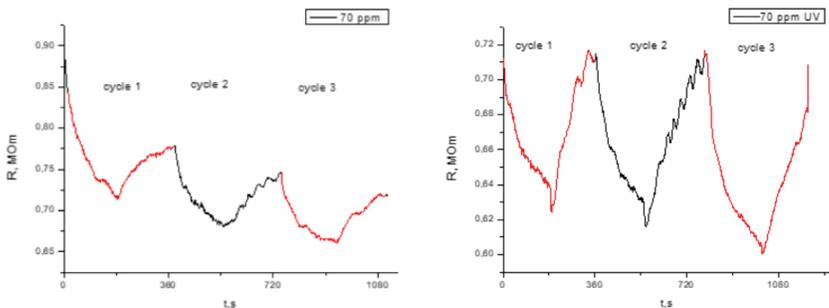


Рис. 2. Зависимость сопротивления сенсора на основе силиконовой матрицы с добавлением УНТ по времени от подачи газа NO_2 70 ppm с восстановлением в течение 3 минут в атмосфере воздуха без применения (слева) и с применением (справа) УФ-излучения

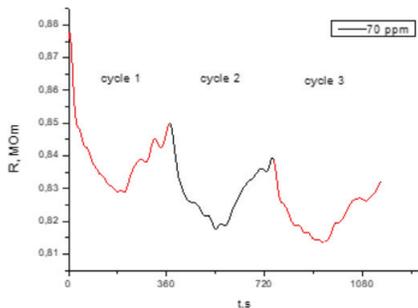


Рис. 3. Зависимость сопротивления сенсора на основе фотополимерной матрицы с добавлением УНТ по времени от подачи газа NO_2 70 ppm с восстановлением в течение 3 минут в атмосфере воздуха

Сенсоры на основе силиконовой резины показывают лучшие газочувствительные характеристики по сравнению с фотополимерной матрицей.

Процент восстановления данных сенсоров в атмосфере воздухе за 3 мин. увеличивается при возрастании концентрации газа, что обусловлено осаждением большего количества адсорбированных молекул газа на поверхности сенсора, а не в объеме нанокompозита.



В сенсорах на основе фотополимерной смолы при больших концентрациях наблюдаются одинаковые значения отклика, что свидетельствует о достижении предела емкости чувствительного слоя данного сенсора.

Применение нековалентной функционализации УНТ (в частности ионной жидкости) для данных сенсоров привело к увеличению дрейфа сопротивления с амплитудой ~30 % от значения отклика, что может свидетельствовать об увеличении расстояния между нанотрубками в объеме пленки на основе фотополимерной и силиконовой матриц.

Литература

1. Rana M. M., Ibrahim D. S., Mohd Asyraf M. R., Jarin S. and Tomal A. A review on recent advances of CNTs as gas sensors // *Sensor Review*, 2017. Vol. 37. № 2. P. 127–136.



УДК 546.26 — 537.226.86

Исследование процесса генерации тока при деформации легированных азотом углеродных нанотрубок для разработки автономных датчиков деформации

Соболева О. И.¹, Ильина М. В.², к. т. н., Ильин О. И.¹, к. т. н.

¹ Южный федеральный университет,
Научно-исследовательская лаборатория
технологии функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
osotova@sfedu.ru

² Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2

Представлены результаты исследования влияния аспектного отношения легированных азотом углеродных нанотрубок (N-УНТ) на величину тока, генерируемого при их деформации. Показано, что с изменением аспектного отношения N-УНТ от 10,9 до 45 величина тока изменяется от 4 до 6,8 мкА при силе прижима 10,5 мкН.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; легирование азотом; датчики деформации; пьезоэлектричество; автономность; интеллектуальные сенсоры.

Активное развитие области носимой электроники привело к необходимости разработки различных миниатюрных датчиков для реализации интерфейсов человек — машина [1], применения в медицине и робототехнике [2]. Наиболее перспективными в данной области показали себя пьезоэлектрические датчики, но все еще идет поиск функциональных материалов. Легированные азотом углеродные нанотрубки (N-УНТ) из-за их аномальных пьезоэлектрических свойств [3, 4], высокой проводимости и гибкости являются перспективным материалом для создания на их основе устройств пьезотроники, в частности датчиков деформации. Целью данной работы является исследование влияния аспектного отношения (АО) длины к диаметру N-УНТ на величину тока, генерируемого при деформации под действием внешней силы.

Эксперименты проводились на массивах N-УНТ, выращенных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на проводящем подслое Mo. Значения АО N-УНТ составляли от 10,9 до 45 и достигались путем изменения параметров роста. Так, температура роста и соотношение технологических газов C₂H₂ и NH₃ изменялись от 500 до 600 °С и от 1:2 до 1:5. Геометрические параметры массивов N-УНТ определялись при помощи растрового электронного микроскопа. Исследование величины тока, генерируемого при деформации N-УНТ, проводилось при помощи силовой спектроскопии атомно-силовой микроскопии (АСМ). После сканирования массива в полуконтактном режиме АСМ-зонд подводился к вершине N-УНТ в контакт, в систему «АСМ-зонд — N-УНТ — проводящий подслой» подавалось напряжение от 0 до 0,2 В и АСМ-зонд давил на вершину N-УНТ с силой от 0,5 до 10,5 мкН. Величина генерируемого тока детектировалась встроенным осциллографом. Сопротивление нагрузки составляло около 10 МОм.



Анализ полученных результатов показал, что без подачи внешнего напряжения смещения величина тока, генерируемого под действием пьезоэлектрического потенциала деформированных N-УНТ, увеличивалась от единиц пА до единиц нА при приложении на АСМ-зонд силы от 0,5 до 2,5 мкН. Этот факт подтверждает возможность автономной работы датчиков деформации на основе массива N-УНТ. При этом с увеличением АО N-УНТ величина генерируемого тока изменялась нелинейно от 0,04 до 2,55 нА и наибольшие значения тока были получены при АО N-УНТ, равном 31,8. С увеличением силы прижима до 10,5 мкН величина генерируемого тока достигала 18,3 нА для N-УНТ с АО 45. При подаче внешнего напряжения смещения 0,2 В величина детектируемого тока увеличивалась до сотен нА. При этом максимальное значение детектируемого тока наблюдалось для N-УНТ с АО, равном 17,5, а величина тока достигала 6,8 мкА при силе 10,5 мкН. Данная зависимость генерируемого тока от АО N-УНТ обусловлена изменением величины их пьезоэлектрического модуля [5] и относительной деформации при приложении заданной силы.

Таким образом, показано, что N-УНТ являются перспективным материалом для создания на их основе пьезоэлектрических датчиков деформации с возможностью автономной работы.

*Исследование выполнено за счет гранта «УМНИК» (очередь-II), договор 20ГУЭС18/91357.
Обработка режимов роста N-УНТ с заданными параметрами выполнена
за счет гранта РФФИ № 22-79-10163.*

Литература

1. Petroniené J. J. et al. Flexible strain sensors: Recent progress 2016-2023 // *Sensors Actuators A Phys.* Elsevier, 2024. Vol. 366. P. 114950.
2. Hu J. et al. Recent progress in flexible micro-pressure sensors for wearable health monitoring // *Nanoscale Adv.* Royal Society of Chemistry, 2023. Vol. 5. № 12. P. 3131–3145.
3. П'ина М. В. et al. Pyrrole-like defects as origin of piezoelectric effect in nitrogen-doped carbon nanotubes // *Carbon* N. Y. Elsevier Ltd, 2022. Vol. 190. P. 348–358.
4. П'ина М. В. et al. Anomalous piezoelectricity and conductivity in aligned carbon nanotubes // *J. Mater. Chem. C*, 2021. Vol. 9. № 18. P. 6014–6021.
5. П'ина М. В. et al. Study of the Piezoelectric Properties of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes for the Development of Energy-Efficient Nanogenerators // *Nanobiotechnology Reports*, 2023. Vol. 18. № 6. P. 858–864.



УДК 621.383

Синтез и функционализация TiS_3 для применения в гибких ИК-детекторах

Рымжина А. Р., д. ф.-м. н. Павельев В. С., Ph.D Трипати Нишант

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С. П. Королева

443086, г. Самара, Московское ш., 34

nastyia.rymzhina.98@mail.ru

Проанализирован гибкий фотодетектор на основе нанолент TiS_3 , функционализированных нитратом серебра. Характеристики фотодетектора определены при освещении лазерным излучением с длиной волны 1064 нм.

Ключевые слова: фотодетектор; трихалькогениды переходных металлов; наноленты TiS_3 ; инфракрасное излучение; функционализация.

Сегодня потребность в гибких фотодетекторах стремительно растет [1]. Большинство известных материалов для них имеют ограниченный диапазон спектральной чувствительности (<1 мкм), низкую скорость отклика и восстановления, что затрудняет их применение на практике [2].

Чтобы преодолеть данные проблемы, необходимо исследовать новые чувствительные материалы, одним из которых является трисульфид титана (TiS_3), вызвавший интерес рядом преимуществ перед другими материалами [3].

В данной работе анализируется гибкий фотодетектор на основе нанолент TiS_3 , функционализированных нитратом серебра (AgNO_3) и осажденных между контактами на гибкой подложке из полиэтилентерефталата (ПЭТ). Характеристики фотодетектора определялись при его взаимодействии с излучением лазера с перестраиваемой мощностью ($\lambda = 1064$ нм).

Разработанный фотодетектор демонстрирует времена отклика и восстановления соответственно 3,09 и 1,73 с. При напряжении смещения 10 В и плотности мощности излучения 150 мВ/см^2 рассматриваемый фотодетектор демонстрирует фототок $\approx 32,63$ нА, fotocувствительность 205 Вт/А, квантовую эффективность 240 А/Вт·нм и обнаружительную способность $2,46 \cdot 10^{10}$ Джонс. Разработанный фотодетектор обладает конкурентоспособными характеристиками и может использоваться в сферах, не требующих быстрого срабатывания.

Литература

6. Segev-Bar M., Naick H. Flexible sensors based on nanoparticles // ACS Nano, 2013. Vol. 7. № 7 (10). P. 8366–8378.
7. Rymzhina A., Sharma P., Pavelyev V., Mishra P., Tripathi N. Recent trends in the fabrication of photodetectors: A detailed analysis on the photodetection properties of new 2D-TMCs // Materials Today Communications, 2023. Vol. 35. P. 106247.
8. Tripathi N., Pavelyev V., Sharma P., Kumar S., Rymzhina A., Mishra P. Review of titanium trisulfide (TiS_3): A novel material for next generation electronic and optical devices // Materials Science in Semiconductor Processing, 2021. Vol. 127. P. 105699.

УДК 537.311.322

Влияние отжига на электрофизические параметры аморфных пленок системы GeTe-Sb₂Te₃

Трусов Е. П., Ермачихин А. В., Литвинов В. Г.

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
eptusov@yandex.ru

Выполнено исследование электрофизических параметров аморфных пленок халькогенидных полупроводников пяти составов по линии квазибинарного разреза GeTe-Sb₂Te₃ в широком температурном диапазоне температурного диапазона. Показано влияние отжига на характеристики тонких аморфных пленок. Приведены временные зависимости энергии активации проводимости, удельного сопротивления.

Ключевые слова: фазовая память; халькогениды; GST; температурное сканирование; электрофизические свойства; энергия активации проводимости; дрейф сопротивления.

На сегодняшний день материалы с фазовым переходом являются важным компонентом существующих и разрабатываемых технологий. Такие материалы обширно изучаются и широко используются в оптической памяти и энергонезависимой электрической памяти (PCM). Фазопеременные материалы могут быть использованы для производства гибких оптических дисплеев с высоким разрешением, интегральной энергонезависимой фотонной памяти, модуляторов и поглотителей излучения в ближней инфракрасной области спектра.

В работе рассмотрены параметры: энергия активации проводимости, дрейф сопротивления, положения уровня Ферми, удельное сопротивление. Исследования проводились в вакууме, при температурах от -150 до 50 °С для материалов Ge₂Sb₂Te₃, GeSb₂Te₄, GeSb₄Te₇, GeTe, Sb₂Te₃. Время между операциями напыления, измерения, отжига для материалов всех составов выдерживалось одинаковым. Хранение образцов между операциями осуществлялось в пластмассовых кейсах, исключающих воздействие света. Отжиг выполнялся при температурах 80 и 100 °С и завершался температурным сканированием проводимости.

На основе данных, полученных при температурном сканировании материалов квазибинарного разреза GeTe-Sb₂Te₃, выполнена оценка тенденции изменения электрофизических свойств этих сплавов в результате снижения концентрации Ge и увеличения концентрации Sb. Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на влияние Ge и Sb на электрические свойства таких соединений и на потенциальное использование семейства этих пленок GST в различных устройствах.

Температурные зависимости энергии активации проводимости и удельного сопротивления для всех составов показывают одинаковую тенденцию. Однако временная зависимость электрофизических характеристик при отжиге или естественном старении для различных материалов имеет существенные различия. Увеличение концентрации Sb способствует изменению влияния отжига на энергию активации проводимости, положение уровня Ферми, удельное сопротивление, дрейф сопротивления.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке FSSN-2020-0003 с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В. Ф. Уткина.



УДК 621.3.049

Система со взаимодействием Дзялошинского — Мория и SOT-эффектом

Турпак А. А., Базров М. А., Кузнецова М. А., Намсараев Ж. Ж.,
Черноусов Н. Н., к. ф.-м. н., Козлов А. Г., к. ф.-м. н., Давыденко А. В.
ДВФУ, Лаборатория пленочных технологий
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
turpak.aa@dvfu.ru

Получена магнитная структура со взаимодействием Дзялошинского — Мория и SOT-эффектом на основе переходных металлов W и Pt. Описан способ получения и исследования образцов.

Ключевые слова: взаимодействие Дзялошинского — Мория; SOT-эффект; доменная граница.

Известно, что переходные металлы W и Pt обладают разными коэффициентами спинового угла Холла [1], и поэтому эффективность передачи углового момента от кристаллической решетки тяжелых переходных металлов в магнитный слой с помощью электронов проводимости (Spin Orbit Torque или SOT-эффект) в этих многослойных структурах может стать нулевой при определенном сочетании толщин W/Pt. Мы исследовали взаимодействие Дзялошинского — Мория (ВДМ) по динамике доменных границ (ДГ) под действием комбинации внешних магнитных полей, а также SOT-эффект с помощью измерения сдвига петель гистерезиса, вызванного током, в многослойных структурах W/Pt/Co/Pt.

Исследование динамики ДГ происходило следующим образом: под действием перпендикулярного магнитного поля зарождался домен, который рос изотропно. При одновременном включении продольного поля, направленного слева направо, и перпендикулярного магнитного поля домен преимущественно начинал расти вправо. Продольное поле нарушало симметрию роста домена. Изменялось расстояние, на которое смешалась ДГ, за время включения магнитных полей. Скорость ДГ определялась как отношение расстояния, пройденного ДГ, к времени включения импульса магнитных полей. Были проанализированы зависимости скорости ДГ от величин продольного и перпендикулярного магнитных полей.

При пропускании зарядового тока через структуру образца генерируется спиновый ток, перпендикулярный плоскости структур и направлению протекания зарядового тока. В результате возникает SOT-эффект, который индуцирует эффективное магнитное поле в магнитном слое и приводит к сдвигу магнитных петель гистерезиса вдоль оси магнитных полей. Путем анализа величин сдвига петель магнитного гистерезиса в зависимости от плотности пропускаемого зарядового тока была определена SOT-эффективность в исследуемых структурах.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России по государственному заданию (проект № FZNS-2023-0012).

Литература

1. Tsung-Yi Chen et al. Current-induced spin-orbit torque efficiencies in W/Pt/Co/Pt heterostructures // Applied Physics Letters, 2020. Vol. 116. P. 072405.



УДК 621.382.33

Особенности формирования омического контакта к p⁺-GaAs-базе гетеробиполярного транзистора на основе гетероперехода InGaP/GaAs

Захаров С. И., Захарова Н. Ю., Козловский Э. Ю.

ЗАО «НПП «Планета-Аргалл»

173004, г. Великий Новгород, ул. Федоровский ручей, 2/13

argall@argall.nov.ru

В данной работе рассмотрены особенности выбора системы металлизации для формирования омического контакта к p⁺-GaAs-базе ГБТ. Опробованы четыре системы омических контактов: Pd/Ge/Ti/Au, Ni/Pd/Au, Pd/Ti/Pd/Au, Ni/Ti/Pt/Ti/Au. Выбрана оптимальная система металлизации для формирования омического контакта к p⁺-GaAs-базе ГБТ.

Ключевые слова: ГБТ; омический контакт; метод длинной линии (МДЛ).

Омические контакты к p⁺-GaAs с низким контактным сопротивлением необходимы для изготовления СВЧ ГБТ на основе GaAs с высокими значениями граничной частоты f_c и максимальной частоты генерации f_{max} . Однако технология изготовления таких транзисторов вносит некоторые ограничения для выбора систем металлизаций для создания омического контакта. Во-первых, для уменьшения сопротивления базы ГБТ и, следовательно, увеличения коэффициента передачи базовый слой делают максимально тонким, что исключает использование «сплавных» омических контактов. Во-вторых, формирование коллекторного омического контакта происходит после базового, поэтому отжиг базового омического контакта должен производиться при тех же (или более высокотемпературных) условиях, что и отжиг коллекторного контакта на основе AuGe/Ni/Au, т.е. базовый контакт не должен деградировать в условиях отжига коллекторного контакта.

Принимая во внимание ограничения, накладываемые конструкцией и технологией изготовления ГБТ, опробованы четыре системы омических контактов Pd/Ge/Ti/Au (20/30/10/100 нм), Ni/Pd/Au (50/50/100 нм), Pd/Ti/Pd/Au (20/20/20/100), Ni/Ti/Pt/Ti/Au (5/5/5/30/100 нм). Приведены значения удельных контактных сопротивлений, полученные на образцах ГБТ, отмечены преимущества и недостатки используемых систем металлизации.

Экспериментально подобрана система металлизации Ni/Ti/Pt/Ti/Au (5/5/5/30/100 нм) с низким контактным сопротивлением и высокой термостабильностью.

Исследования проводились в процессе разработки ГБТ, технология изготовления которого может быть использована для изготовления СВЧ МИС ГУН с малыми фазовыми шумами.



УДК 538.935

Эффект Аронова — Альтшулера — Спивака и характерный размер неоднородностей интерфейса гетероструктур AlGaIn/AlN/GaN

Колобкова Е. М.¹, Андреев А. А.¹, к. ф.-м. н. Белов И. В.¹, к. ф.-м. н. Валеев В. Г.¹, Грищенко Ю. В.¹, к. ф.-м. н. Давыдов А. Б.², Езубченко И. С.¹, Куликов И. В.¹, к. ф.-м. н. Моргун Л. А.², к. ф.-м. н. Николаев С. Н.¹, Перминов П. А.¹, к. ф.-м. н. Черных И. А.¹, к. ф.-м. н. Чумаков Н. К.¹, Шабанов С. Ю.¹, к. ф.-м. н. Занавескин М. Л.¹

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
kolobkovaevg@gmail.com

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

Структура конфайнмента двумерного электронного газа (2DEG) нитридных транзисторов с высокой подвижностью электронов, синтезированных по технологии, разработанной в НИЦ КИ, исследована посредством электрофизических экспериментов на основе анализа параметров осцилляций магнитосопротивления 2DEG, обусловленных эффектом Аронова — Альтшулера — Спивака.

Ключевые слова: GaN HEMT; нитридные гетероструктуры; эффект Аронова — Альтшулера — Спивака.

В работе [1] создана новая технология фабрикации нитридных транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) для силовой и СВЧ электроники. Она позволяет получить гетероструктуры с 2DEG приборного качества, понизить температуру активной области более чем на 50 °С по сравнению с аналогами на подложках карбида кремния и состоит в формировании уникальных составных подложек поликристаллического алмаза с тонким слоем монокристаллического кремния Si (111) и последующем синтезе GaN-гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Однако контроль качества рабочего интерфейса таких структур посредством атомно-силовой микроскопии (АСМ) весьма затруднителен ввиду относительно большого и априори не всегда известного диапазона характерных размеров дефектов, возникающих в нем в процессе роста.

В настоящей работе продемонстрированы диагностические возможности метода исследования особенностей потенциала конфайнмента 2DEG нитридных HEMT, основанные на анализе результатов наблюдения осцилляций Аронова — Альтшулера — Спивака (ААС) [2] в магнитосопротивлении 2DEG в широком диапазоне магнитных полей. Показано, что описанный здесь метод позволяет определить характерные масштабы сложной структуры дефектов вблизи интерфейса, согласующиеся с результатами АСМ, и служит полезным дополнением к атомно-силовой технологии характеризации поверхности.

Магнитотранспортные исследования системы проведены в интервале температур 100 мК — 300 К и магнитных полях В до 14 Тл, приложенных перпендикулярно плоскости 2DEG. В области слабой локализации (WL) обнаружено



отрицательное низкотемпературное магнитосопротивление величиной порядка 1%, переход от слабой WAL к WL имеет место при $B \approx 0,005$ Тл. Осцилляции магнитосопротивления 2DEG с периодом $h/2e$, обусловленные эффектом ААС, отчетливо наблюдаются на фоне его плавного поведения. Эти осцилляции — результат интерференции волновых функций носителей заряда на траекториях, связанных друг с другом обращением времени. Они позволяют связать структуру AlN/GaN интерфейса НЕМТ в реальном пространстве с неоднородностью конфайнмента 2DEG вблизи него и оценить характерные размеры этой неоднородности.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант №23-29-00536.

Литература

1. Chernykh M. Y., Andreev A. A., Ezubchenko I. S. et al. GaN-based heterostructures with CVD diamond heat sinks: A new fabrication approach towards efficient electronic devices // *Appl. Mater. Today*, 2022. Vol. 26. P. 101338.
2. Альтшулер Б.Л., Аронов А.Г., Спивак Б.З. Эффект Ааронова — Бома в неупорядоченных проводниках // *Письма в ЖЭТФ*, 1981. — Т. 33 (2). — С. 101–103.



УДК 53.06

Исследование процессов многофиламентарного переключения в ячейках RRAM

Федотов М. И.^{1,2,5}, Ванькаев А. С.³, Клюкина Е. В.⁴,
к. ф.-м. н. Ковешников С. В.⁵

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

⁴ Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)

119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

⁵ Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособленных материалов РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

Проведено экспериментальное исследование процессов переключения в резистивной памяти на основе оксидов переходных металлов (HfO_x, TiO_x). Получены экспериментальные зависимости разброса сопротивления в высокоомном состоянии от максимального напряжения, а также исследованы процессы плавного перехода из низкоомного в высокоомное состояние. Разработана физическая модель многофиламентарного переключения, объясняющая полученные экспериментальные данные.

Ключевые слова: RRAM; проводящий филамент; оксид гафния; оксид титана; нейроморфные системы.

Одним из перспективных вариантов компонентой базы для аналоговых нейроморфных систем является резистивная память (RRAM) [1]. Ключевое преимущество RRAM — возможность многоуровневого переключения за счет плавного перехода из высокоомного (HRS) в низкоомное (LRS) состояние [2]. Однако, несмотря на прогресс в разработке многоуровневых элементов резистивной памяти на основе оксидов металлов, их практическое использование ограничено рядом нерешенных проблем [3]. Одной из них является невозможность воспроизводимости сопротивления в HRS, что ограничивает число практически достижимых логических состояний. Решение данной проблемы невозможно без понимания физического механизма резистивного переключения.

В рамках данной работы мы провели исследования ячеек RRAM на основе двух оксидов переходных металлов — HfO_x и TiO_x. В ячейках RRAM на основе оксида гафния исследовалась невозможность воспроизводимости сопротивления в низко- и высокоомном состоянии в зависимости от максимального напряжения в режиме Reset (рис. 1), в то время как в ячейках RRAM на основе оксида гафния оксида титана изучался процесс плавного Reset (рис. 3). Для объяснения полученных результатов нами разработана модель многофиламентарного резистивного переключения. Мы предположили, что в одной ячейке RRAM может формироваться не один,

а сразу несколько проводящих филаментов различной длины. В зависимости от соотношения длин филаментов разработанная нами модель позволяет объяснить и невоспроизводимость сопротивления в высокоомном состоянии (рис. 2), и эффект плавного переключения в режиме Reset (рис. 3).

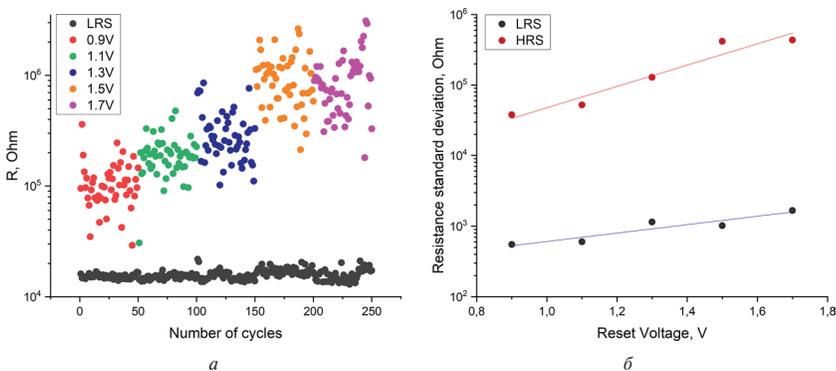


Рис. 1. Разброс сопротивления ячейки HfOx RRAM в низкоомном и пяти высокоомных состояниях (а); стандартное отклонение сопротивления в высокоомном состоянии при разных напряжениях в Reset (б)

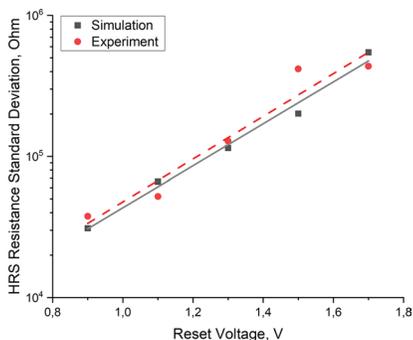


Рис. 2. Сравнение экспериментально измеренной и смоделированной зависимости стандартного отклонения сопротивления ячейки HfOx RRAM в HRS от напряжения в Reset

Результаты нашей работы показывают, что наличие многих филаментов в ячейке RRAM является преимуществом, а не недостатком, так как обеспечивает плавный Reset и достижение надежных промежуточных резистивных состояний. Матрицы RRAM с многоуровневым переключением позволяют создать качественно новые аналоговые нейроморфные вычислительные системы, способные в будущем значительно превзойти цифровые нейросети по производительности.

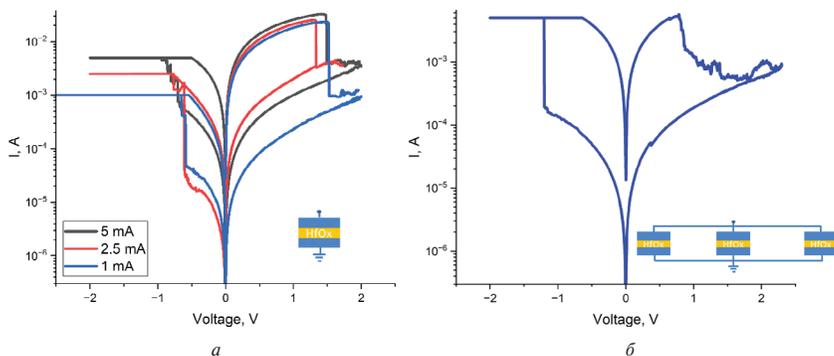


Рис. 3. ВАХ трех однофиламентных ячеек TiOx RRAM при различных максимальных токах (а); ВАХ тех же ячеек, соединенных параллельно (б)

Литература

1. Zhuk M., Zarubin S., Zenkevich A., Karateev I., Matveyev Y., Gornev E., Krasnikov G., Negrov D. On-Chip TaOx-Based Non-volatile Resistive Memory for in vitro Neurointerfaces // *Frontiers in Neuroscience*, 2020. Vol. 14. № APR. P. 94.
2. Sarkar B., Lee B. and Misra V. Understanding the gradual reset in Pt/Al2O3/Ni RRAM for synaptic applications // *Semiconductor Science Technology*, 2015. Vol. 30. № 10.
3. Fedotov M. I., Korotitsky V. I. and Koveshnikov S. V. Experimental and Theoretical Study of Intrinsic Variability in Hafnium Oxide Based RRAM // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2021. P. 26–32.

УДК 538.975

Мемристоры на основе HfO_2 и миграции ионов Ag

Жидков Н. С., Ханас А. Р., к. ф.-м. н., Зенкевич А. В., к. ф.-м. н.

Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассматриваются мемристоры с резистивными переключениями на основе миграции ионов серебра в слое из HfO_2 . Исследуются параметры материалов, приводящие к энергонезависимым и энергозависимым переключениям. Предложен способ низкотемпературного синтеза наночастиц Ag для улучшения параметров резистивно переключающихся ячеек.

Ключевые слова: мемристор; оксид гафния; резистивные переключения; нейроморфные вычисления.

Нейроморфные системы — одна из перспективных вычислительных концепций, которые могут решить проблемы традиционной фон-неймановской архитектуры. Одним из важных направлений их развития является разработка нейроморфной элементной базы, т. е. масштабируемых микроэлектронных устройств, эмулирующих функциональность нейронов и синапсов мозга. Использование мемристоров (элементов с переменным сопротивлением, осуществляемым эффектом обратимого резистивного переключения) является одним из наиболее перспективных способов реализации таких устройств.

Среди многочисленных материалов и механизмов для резистивных переключений выделяется миграция ионов серебра в функциональном диэлектрическом слое HfO_2 . Встречаются как энергонезависимые (долговременные), так и энергозависимые (пороговые) ячейки на основе сплошных пленок [1], а также на основе нанокластеров Ag [2]. Последний подход существенно улучшает параметры резистивных переключений ячеек, однако для его реализации обычно требуются высокие температуры, что может быть нежелательно при дальнейшем производстве СБИС по этой технологии. В данной работе предлагается использовать метод импульсного лазерного осаждения (ИЛО) наночастиц Ag при низких температурах для создания мемристоров на основе HfO_2 .

Изготовлены структуры $\text{TiN}/\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ (HZO)/Ag/Pt, в которых слой нижнего электрода TiN и аморфный слой HZO (толщиной 10 нм) были сформированы методом атомно-слоевого осаждения. Слои Ag и Pt были сформированы методом ИЛО, из-за особенностей которого на поверхности HZO образовывались нанокластеры Ag с линейными размерами до нескольких десятков нанометров. В работе исследуются различные режимы резистивных переключений в зависимости от технологии изготовления устройств.

Литература

1. Midya R. et al. Anatomy of Ag/Hafnia-Based Selectors with 10^{10} Nonlinearity // Advanced Materials, 2017. 29, 1604457.
2. Li Y. et al. High-Uniformity Threshold Switching HfO_2 -Based Selectors with Patterned Ag Nanodots // Advanced Science, 2020. 7, 2002251.



УДК 538.9

Магнитоплазменные колебания в сильноэкранированных прямоугольных двумерных электронных системах

Родионов Д. А.^{1,2}, Загороднев И. В.¹¹ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе исследованы свойства собственных магнитоплазменных колебаний в сильноэкранированной двумерной электронной системе в форме прямоугольника. Оказалось, что в сильных магнитных полях частота всех плазменных мод стремится к нулю обратно пропорционально его величине, чего не наблюдается в других геометриях, таких как полоса, диск или полуплоскость. Также показано, что динамика магнитоплазменных колебаний в рассматриваемых системах аналогична динамике ротационно-гравитационных волн на мелкой воде в бассейне той же геометрии.

Ключевые слова: двумерные электронные системы; плазменные колебания; ротационно-гравитационные волны на мелкой воде.

Одной из важных фундаментальных задач в области физики конденсированного состояния является исследование свойств коллективных колебаний носителей заряда — плазменных колебаний или плазмонов — в двумерных электронных системах в связи с перспективами их возможного применения в области обнаружения и генерации терагерцевого излучения. Так, в недавней работе [1] экспериментально изучались плазменные колебания в квадратных двумерных электронных системах, в частности зависимость их частоты от внешнего магнитного поля (магнитодисперсия).

В нашей теоретической работе [2] исследуются свойства собственных магнитоплазменных колебаний в прямоугольном двумерном электронном газе, помещенном в постоянное однородное магнитное поле, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости электронного газа. Электронная система находится вблизи идеально проводящей бесконечной металлической пластины (затвора). Задача решалась в пределе сильной экранировки, т. е. рассматривался случай малости расстояния между электронным газом и металлом по сравнению с размерами прямоугольника и длинами волн изучаемых плазменных колебаний.

Как и в работе [1], наблюдается «расталкивание» магнитодисперсии некоторых плазменных колебаний. Кроме этого, частоты всех плазменных мод в сильных магнитных полях стремятся к нулю, включая фундаментальную, т. е. нижайшую по частоте. Это отличается от известного поведения магнитодисперсии фундаментальной моды, являющейся краевым магнитоплазмоном, в других геометриях, таких как диск, полоса или полуплоскость [3], где частота принимает ненулевое асимптотическое значение. Установлено, что в сильных магнитных полях частоты всех мод обратно пропорциональны циклотронной частоте. В случае квадратной геометрии найдены аналитические аппроксимации частоты нижайших плазменных мод, в том числе в области больших магнитных полей.



Также показано, что магнитоплазменные колебания в латерально ограниченных двумерных электронных системах имеют схожие свойства с волнами на мелкой воде, подверженной воздействию силы Кориолиса, в бассейне той же геометрии. Отметим, что наблюдаемое сходство полностью верно для линейных волн. Вероятно, оно может быть распространено и на нелинейные волны, однако неполностью. Так, например, в гидродинамике существует эффект опрокидывания волны, когда у нее возникает гребень. В электродинамике такое невозможно, поскольку аналогичный гребень у плотности заряда привел бы к неоднозначности порождаемого ею потенциала в каждой точке пространства.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Родионов Д. А. благодарит Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 21-1-5-133-1).

Литература

1. Zarezin A. M., Mylnikov D., Petrov A. S., Svintsov D., Gusikhin P. A., Kukushkin I. V., Muravev V. M. Plasmons in a square of two-dimensional electrons // *Physical Review B*, 2023. Vol. 107. P. 075414.
2. Rodionov D. A., Zagorodnev I. V. Fully screened two-dimensional magnetoplasmons and rotational gravity shallow water waves in a rectangle // *Physical Review B*, 2024. Vol. 109. P. L241402.
3. Zagorodnev I. V., Zabolotnykh A. A., Rodionov D. A., Volko V. A. Two-Dimensional Plasmons in Laterally Confined 2D Electron Systems // *Nanomaterials*, 2023. Vol. 13. P. 975.



УДК 535.015

Генерация второй гармоники и широкополосная фотолюминесценция в мезопористых наночастицах Si/SiO₂

Масталиева В. А.^{1,2}, Неплох В. В.^{1,3}, Айбуш А. В.⁴, Макаров С. В.⁵,
Мухин И. С.^{1,3,5}

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
rebecconi@gmail.com

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б

⁴ Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н. Н. Семенова Российской академии наук
119991, г. Москва, ул. Косыгина, 4, корп. 1

⁵ Qingdao Innovation and Development Center, Harbin Engineering University
Shandong, China

Преобразователи инфракрасного излучения в видимый диапазон востребованы при создании нелинейно-оптических устройств. В данной работе изучены нелинейно-оптические свойства монодисперсных сфер SiO₂ и Si/SiO₂, инкапсулированных в силиконовые пленки. Изготовленные два типа мембран, содержащие сферические наночастицы SiO₂ и Si/SiO₂, демонстрировали яркий сигнал генерации второй гармоники во всем видимом диапазоне.

Ключевые слова: генерация второй гармоники; кремний; наноструктуры; преобразователи ИК-излучения; мезопористые наночастицы.

Пористая структура кремния может обладать высокой удельной площадью поверхности, превышающей 100 м²/г [1]. В последние десятилетия это служит одной из причин активного изучения поверхностно-связанного эффекта генерации второй гармоники (ГВГ) в мезопористом кремнии [2]. Согласование электромагнитного поля при облучении накачки и генерируемой второй гармоники (ВГ) в наноразмерных резонаторах [3, 4] приводит к повышению эффективности преобразования и позволяет управлять оптическими свойствами системы [5].

В данной работе были исследованы образцы на стекле двух видов: мезопористые наночастицы Si/SiO₂ до и после отжига в инертной атмосфере при температуре 850 °С. Сферические мезопористые наночастицы Si/SiO₂ (мезо-Si/SiO₂ NPs) синтезированы в два этапа. На первом этапе были получены сферические частицы SiO₂ путем гидролиза тетраэтоксисилана в спирто-водно-аммиачной среде, содержащей цилиндрические мицеллы бромида цетилтриметиламмония в качестве порообразователя. Для удаления органических веществ полученные частицы были отожжены на воздухе при температуре 550 °С в течение 5 ч. Удельная площадь поверхности и объем пор синтезированных частиц составили 810 м²/г и 0,55 см³/г (около 50 % объема частиц) соответственно, а диаметр пор — около 3 нм [6]. На втором этапе для введения кремния в поры частиц SiO₂ использовался метод термического разложения моносилана. В результате получены сферические частицы SiO₂,

заполненные кремнием. Благодаря пористой структуре образцы обладают развитой поверхностью (до $300 \text{ м}^2/\text{г}$ [1]), что позволяет изучать оптические свойства поверхности кремния.

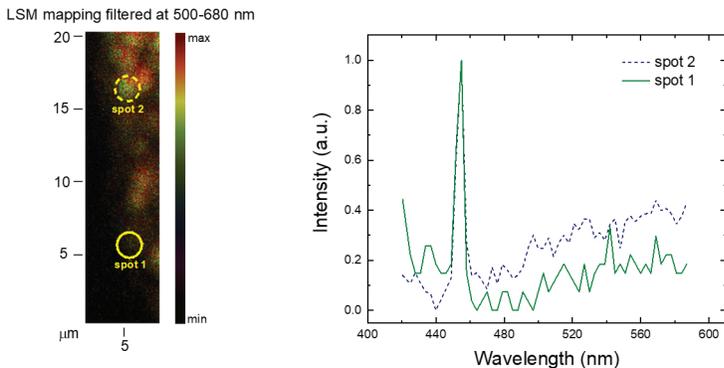


Рис. 1. ЛКСМ-карта слоя наночастиц Si/SiO₂ НЧ, интегрированная в спектральном диапазоне 500–680 нм, соответствующем сигналу ФЛ (а); соответствующие спектральные характеристики. Кружки на карте обозначают места получения спектров (б)

В работе проведено сравнение генерации второй гармоники в образцах наночастиц, в которых происходит изменение фазы кремния (из аморфного в нанокристаллический) в порах мезопористых наночастиц Si/SiO₂. В одном случае — из-за термического отжига в инертной атмосфере, в другом случае — в результате нагрева импульсами лазерного излучения (фемтосекундным лазером ИК-диапазона). Эти методы также усиливают вторую гармонику и фотолуминесцентный отклик. Полученные рамановские спектры подтвердили наличие кристаллической фазы Si, что проявилось в заметной узкой линии при $518,5 \text{ см}^{-1}$, соответствующей поперечной оптической фононной моде кристаллического Si. Сдвиг на $1,5 \text{ см}^{-1}$ относительно объемного c-Si 520 см^{-1} соответствует nc-Si размером 5–10 нм в соответствии с ранее полученными нами результатами [1], что также коррелирует с данными, приведенными в литературе [7].

Для нелинейно-оптических измерений образцы из коллоида наночастиц наносились на предварительно очищенные закаленные кварцевые стекла. Исследования проводились с помощью установки лазерного конфокального сканирующего микроскопа (ЛКСМ) (LSM-980, Zeiss, Германия). Через порт внешнего акустооптического модулятора (АОМ) LSM подавались фемтосекундные лазерные импульсы (Discovery-NX, Coherent, США) с частотой повторения 80 МГц, длительностью 150 фс, диапазон длин волн излучения — 800–1020 нм. Оптимальной длиной волн для исследуемых образцов является диапазон 900–980 нм.

Таким образом, продемонстрирован метод формирования мезопористых кремниевых наноструктур для эффективной генерации второй гармоники и возможность контролируемого изменения фазы кремния с аморфной в нанокристаллическую со значительным увеличением эффективности ГВГ. Результаты могут быть использованы для создания преобразователей и визуализаторов ИК-излучения



в видимый диапазон, а также для проектирования фотонных платформ на основе кремниевых материалов.

Работа поддержана грантом РФФ №23-79-00018 «Исследование нелинейных оптических свойств Si и гибридных SiO₂/Si-наноструктур для создания ИК-визуализаторов».

Литература

1. Kurdyukov D. A. et al. Fabrication of doxorubicin-loaded monodisperse spherical micro-mesoporous silicon particles for enhanced inhibition of cancer cell proliferation // *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019. Vol. 281. P. 1–8.
2. Ha M. et al. Multicomponent plasmonic nanoparticles: from heterostructured nanoparticles to colloidal composite nanostructures // *Chemical reviews*, 2019. Vol. 119. № 24. P. 12208–12278.
3. Nikolaeva A. et al. Large-scale flexible membrane with resonant silicon nanowires for infrared visualization via efficient third harmonic generation // *Applied Physics Letters*, 2022. Vol. 120. № 15.
4. Fedorov V. V. et al. Gallium phosphide nanowires in a free-standing, flexible, and semi-transparent membrane for large-scale infrared-to-visible light conversion // *ACS nano*, 2020. Vol. 14. № 8. P. 10624–10632.
5. Rudenko A., Han A., Moloney J. V. Trade-Off between Second- and Third-Order Nonlinearities, Ultrafast Free Carrier Absorption and Material Damage in Silicon Nanoparticles // *Advanced Optical Materials*, 2023. Vol. 11. № 2. P. 2201654.
6. Trofimova E. Y. et al. Monodisperse spherical mesoporous silica particles: Fast synthesis procedure and fabrication of photonic-crystal films // *Nanotechnology*, 2013. Vol. 24. № 15. P. 155601.
7. Makarov S. V. et al. Nanoscale generation of white light for ultrabroadband nanospectroscopy // *Nano letters*, 2018. Vol. 18. № 1. P. 535–539.

УДК 543.424.2

Исследование влияния методов активации на структурные и электродинамические свойства ГКР активной пленки на основе Ag-Nb-N-O для фотонной сенсорики

Новиков Д. В.¹, к. т. н., Дубков С. В.¹, к. т. н., Лебедев Е. А.¹, Чумаченко Ю. В.¹, Громов В. Д.¹, Волкова Л. С.², Рязанов Р. М.³

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

tororo@bk.ru

² Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук

119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А

³ Научно-производственный комплекс «Технологический центр»

Московского института электронной техники

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

Разработана ГКР-подложка на основе тонкой многокомпонентной пленки Ag-Nb-N-O. Исследовано влияние методов экспресс-активации на морфологию поверхности и характеристики разработанной ГКР-подложки. Исследована устойчивость разработанной ГКР-подложки к длительному воздействию атмосферы.

Ключевые слова: ГКР-подложка; спектроскопия комбинационного рассеяния света; Ag; Nb; тонкая пленка; наночастицы.

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР-спектроскопия) является перспективным методом анализа. Малые времязатраты на пробоподготовку и изучение образцов, высокая чувствительность и способность различать даже близкие по составу и структуре молекулы качественно выделяют ГКР-спектроскопию среди прочих методов качественного анализа. Ключевым элементом данного метода являются ГКР-подложки (сенсор), представляющие собой твердотельную пластину с массивом плазмонных наночастиц на поверхности. Эти же подложки являются основным недостатком данного метода, так как со временем наночастицы могут окисляться под действием атмосферы, что снижает чувствительность подложки, либо поверхность сенсора покрывается адсорбированными из воздуха веществами, что значительно ухудшает качество дальнейшего анализа. Для решения данных проблем подложки могут вакуумироваться после изготовления или химически обрабатываться перед измерением, что имеет свои недостатки. В данной работе был исследован иной подход к решению описанных проблем, заключающийся в формировании наночастиц из тонкой пленки (активации) непосредственно перед измерением за счет энергетического воздействия, что также позволяет удалить адсорбированные загрязнения.

В данной работе исследовалась ГКР-подложка на основе тонкой многокомпонентной пленки Ag-Nb-N-O. Формирование пленки производилось методом магнетронного распыления мишеней Nb и Ag в атмосфере Ag + об.10% N₂ на монокристаллическую кремниевую подложку со слоем окисла 300 нм и частично пропиленной поверхностью, образующей прямоугольника длиной 26 мм и шириной 6 мм. Энергетическое воздействие осуществлялось двумя вариантами:



СВЧ-излучением мощностью 800 Вт в течение 15 секунд в бытовой микроволновой печи Samsung ME711KR; пропусканием тока порядка 280 мА в течение 1 минуты через подложку в гальваностатическом режиме.

Исследование ГКР-активности производилось с использованием растворов родамина 6G (R6G) концентрациями от 10^{-5} до 10^{-10} М. Измерения проводились при мощности лазера 44 мкВт, длине волны 532 нм, длительности измерения 1 секунда, диаметре пучка $1,5 \text{ мкм}^2$.

Установлено, что после изготовления в течение 20 дней часть серебра постепенно выделяется на поверхность подложки в виде разреженного массива полусферических многогранных наночастиц со средним диаметром 130 нм, расстоянием между частицами 500 нм и плотностью массива 5 мкм^{-2} . При этом исследование торца свежего скола ГКР-подложки показало, что основная масса Ag продолжает содержаться в объеме пленки.

Воздействие электрическим током порядка 280 мА в течение 1 минуты позволило сформировать массив полусферических наночастиц со средним диаметром 165 нм, расстоянием между частицами 138 нм и плотностью массива 14 мкм^{-2} . При этом подложка разогревалась до 280°C , что с высокой долей вероятности удаляло адсорбированные вещества.

Влияние СВЧ-излучения в течение 15 секунд провоцировало формирование массива наночастиц сложной формы со средними диаметром и расстоянием между наночастицами 260 и 72 нм соответственно при плотности массива 12 мкм^{-2} . Ввиду невозможности определения температуры подложки непосредственно в момент активации, непосредственно после процесса был применен тепловизор, установивший температуру свыше 100°C .

Дальнейший анализ ГКР-активности подложек показал, что активация электрическим током позволяет достичь коэффициента усиления порядка 10^5 и предела детектирования 10^{-8} М R6G. При этом активация подложки СВЧ-излучением позволила достичь коэффициента усиления порядка $8 \cdot 10^6$ и предела детектирования вещества 10^{-10} М. Отдельно стоит отметить, что перед активацией подложки хранились вне вакуума в течение 60 дней. При этом полученные спектры не демонстрировали присутствие посторонних веществ или следов углерода, характерные для органических соединений, подвергшихся неполному термическому разложению.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда

№ 24-19-00610, <https://rscf.ru/project/22-19-00654>.



УДК 004.891.3:621.382.2/3

Разработка системы автоматизированного подсчета полупроводниковых кристаллов VZOR

Сухомлинов Р. С., Васильченко Д. В., Ромащенко М. А.

Воронежский государственный технический университет

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

kpr@vorstu.com

Разработана система для автоматизированного подсчета годных кристаллов на полупроводниковых пластинах. В ее основе лежит система формирования цифрового изображения, которое далее анализируется с использованием нейронных сетей. Применение механической системы демпфирования обеспечивает равномерное распределение давления на пластину во время ее прижима к сканирующему устройству для формирования изображения.

Ключевые слова: электронный компонент; машинное зрение; дефектоскопия; оптическая инспекция; неразрушающий контроль.

В последние годы российская микроэлектронная промышленность сталкивается с серьезной проблемой отсутствия современного отечественного оборудования для производства микроэлектронных компонентов. Данная проблема негативно сказывается на развитии отрасли, делая ее зависимой от импортных технологий и комплектующих. В условиях нарастающих санкционных ограничений и политической нестабильности такая зависимость представляет помеху для устойчивого роста и технологической независимости страны.

Автоматизированная оптическая инспекция (АОИ) является важным элементом в производстве микроэлектроники. Она предоставляет точные методы контроля качества. Современные АОИ-системы заменяют человеческий глаз путем совмещения оптики высокого разрешения и возможностей ЭВМ. Они предназначены для визуального контроля и выявления дефектов на выпускаемых изделиях. Это актуально, поскольку размеры и сложность полупроводниковых изделий постоянно увеличиваются и традиционные методы инспекции становятся недостаточными для обеспечения требуемого уровня скорости и точности производства.

Методы глубокого машинного обучения и нейронных сетей в последнее время значительно повысили возможности систем АОИ при обнаружении и классификации дефектов, что позволило улучшить общую производительность и адаптацию к новым типам дефектов. Например, в [1] рассматриваются гибридные многоканальные системы, использующие глубокие нейронные сети для улучшения автоматизированной визуальной инспекции. Такой метод приводит к повышению точности обнаружения дефектов и увеличению скорости обнаружения ошибок.

Описываемое устройство (рис. 1) предназначено для автоматизированного подсчета количества качественных кристаллов на полупроводниковых пластинах [2]. При этом на предыдущем этапе функционального контроля кристаллы, не соответствующие требованиям, были помечены точками красящего состава. Основная задача заключается в получении изображения пластины с помощью сканирующего устройства и последующем его анализе с использованием методов машинного обучения. Нейронные сети сравнивают полученное изображение



с эталонными образцами, представляющими различные состояния пластины, чтобы подсчитать количество годных кристаллов.

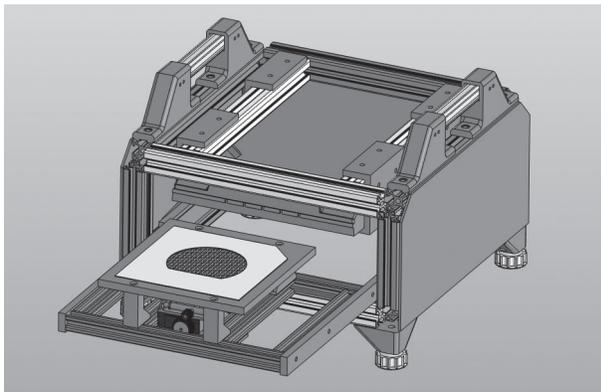


Рис. 1. Система автоматизированного подсчета полупроводниковых кристаллов VZOR

Процесс работы устройства включает следующие этапы. Перед началом сканирования демпфирующая система плотно прижимает пластину. Сканирующее устройство формирует цифровое изображение высокой четкости. Далее полученные изображения передаются в систему обработки, где происходит анализ обученной нейронной сетью и подсчет годных кристаллов. Таким образом, обеспечивается автоматизированный и высокоточный контроль, исключающий человеческую ошибку (рис. 2).



Рис. 2. Процесс анализа пластины

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие результаты. Разработан алгоритм, который использует изображение, сформированное с помощью сканирующего устройства, и нейронные сети для его анализа. Также создана механическая система демпфирования. Она обеспечивает равномерное



распределение давления на пластину во время прижима к сканирующему устройству. Это предотвращает вероятность повреждения и гарантирует получение качественного изображения без артефактов.

Введение подобных инноваций в производственные процессы способствует снижению уровня брака и повышению производственной эффективности, обеспечивая высокое качество конечной продукции в микроэлектронной промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках конкурса «Старт-23-1» (очередь II) (договор № 5049ГС1/89569 от 24.10.2023).

Литература

1. Ромашенко М. А., Васильченко Д. В. Разработка аппаратной части комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2024. — Т. 20. — № 2. — С. 110–115. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.2.017. EDN CLR1YQ.
2. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие. 9-е изд., стер. — СПб.: Лань, 2021. — 480 с.: ил. ISBN 978-5-8114-0368-4.



УДК 620.22

Макетное моделирование церебральных сосудов с гигантской аневризмой для верификации компьютерной модели оценки необходимости нейрохирургических вмешательств

Горина А. В.¹, Галястов А. А.^{1,2}, Ставцев Д. Д.^{1,2}, Коновалов А. Н.^{1,3},
Гребнев Ф. В.^{1,3}, Тельшев Д. В.^{1,2}

¹ Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России

(Сеченовский Университет)

119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

gorina_a_v@staff.sechenov.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

³ Нейрохирургический центр им. Бурденко

125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16

Определен алгоритм получения фантома сосуда головного мозга с аневризмой для проведения стендовых испытаний для верификации компьютерной модели. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования и стендовых испытаний.

Ключевые слова: церебральная аневризма; CFD-моделирование; гемодинамика; цифровая трассерная визуализация; лазерная спекл-контрастная визуализация; фантом сосуда.

Аневризма сосудов головного мозга представляет большую опасность для жизни и здоровья пациента в случае ее разрыва, так как приводит к внутримозговому кровоотечению [1, 2]. Для нейрохирургов важно обладать информацией о характере кровотока для принятия решения о ходе дальнейшего лечения пациента. Данные о потоке можно получить из результатов компьютерного моделирования, которые необходимо верифицировать с помощью стендовых испытаний на фантоме исследуемой модели, используя методы визуализации кровотока, такие как цифровая трассерная визуализация (ЦТВ) и лазерная спекл-контрастная визуализация (ЛСКВ).

Метод ЦТВ основан на регистрации движения флуоресцентных микрочастиц, добавленных в исследуемую жидкость, с помощью высокоскоростной камеры FASTCAM Mini AX 100 (Photron Limited, Токио, Япония) под воздействием излучения твердотельного лазерного модуля непрерывного действия с диодной накачкой с длиной волны 532 нм MGL-F-532 (Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., Чанчунь, КНР). С помощью ЛСКВ анализируется изменение спекл-картин, образованных в результате рассеяния света на движущихся частицах. Во время проведения стендовых испытаний камерой NIR camera acA2040-90umNIR (Basler AG, Germany) с лазерным диодом LD785-SH300 (Thorlabs Inc., США) с длиной волны 785 нм регистрируются изображения спеклов, образованные в результате движения жидкости.

Для проведения стендовых испытаний и беспрепятственной регистрации движения жидкости необходимо, чтобы фантом был изготовлен из прозрачных материалов. Фантом сосуда можно получить с помощью LCD-печати из прозрачной

фотополимерной смолы, а также путем отливки из прозрачного силикона. Из полидиметилсилоксана (ПДМС) заливаются две части мастер-модели с полостью в форме сосуда, которые после застывания склеиваются между собой, или одна часть склеивается с предметным стеклом. Кроме того, можно создать фантом методом послойного погружения пластиковой модели в ПДМС, далее модель выплавляется и остается силиконовая оболочка с фиксированной толщиной стенки [3, 4].

Были проведены стендовые испытания на четырех видах фантомов, результаты которых были сопоставлены с результатами компьютерного моделирования. С помощью ЦТВ возможно регистрировать движение частиц во всех случаях при условии равномерности внешней поверхности, чтобы не вызывать искажений на камере. Для ЛСКВ подходит вариант фантома с предметным стеклом, так как данный метод регистрирует движение в пристеночном слое.

Литература

1. Penn D.L., Komotar R.J., Connolly E.S. Hemodynamic mechanisms underlying cerebral aneurysm pathogenesis // *Journal of Clinical Neuroscience*, May 2011. 18, 1435–1438.
2. Lazzaro M.A., Ouyang B., Chen M. The role of circle of Willis anomalies in cerebral aneurysm rupture // *J. NeuroIntervent Surg.*, 2012. (4), 22–26.
3. Nilsson D.P.G., Holmgren M., Holmlund P., Wåhlin A., Eklund A., Dahlberg T., Wiklund K., Andersson M. Patient-specific brain arteries molded as a flexible phantom model using 3D printed water-soluble resin // *Sci. Rep.*, Jun, 2002. 12 (1), 10172.
4. Hayakawa T., Maruyama H., Watanabe T., Arai F. Three-Dimensional Blood Vessel Model with Temperature-Indicating Function for Evaluation of Thermal Damage during Surgery // *Sensors (Basel)*, Jan., 2018. 18 (2), 345.



УДК 621.3.049

Соотношение физиологических характеристик стадий сна между одновременно регистрируемыми ЭЭГ и МЭГ

Григорьева О. А., Клеева Д. Ф.

Национальный исследовательский университет

«Высшая школа экономики»

662972, г. Москва, Покровский бульвар, 11, стр. 10

olia.grigoreva2018@gmail.com

Проведен комплексный анализ различных физиологических маркеров сна, выделенных в одновременно зарегистрированных ЭЭГ- и МЭГ-данных с их последующим сопоставлением в пределах нескольких стадий. Реализован синтез данных «смешанной» модальности при помощи реконструкции источников по МЭГ-записи с применением обратного оператора и изменением параметров нейросети UNET.

Ключевые слова: физиологические маркеры сна; реконструкция источников; классификация стадий сна.

Продолжительное время записи, полученные при помощи ЭЭГ, являлись некоторым золотым стандартом при выделении различных стадий сна. В связи с этим положением во многих работах, посвященных описанию классификаторов стадий сна, упоминается факт обучения моделей в большинстве случаев на данных, полученных при помощи ЭЭГ [1]. Таким образом, можно предположить получение на практике низких значений сходимости между последовательностями стадий, предсказанных при помощи классификаторов на основании МЭГ-данных, и последовательностями стадий, предсказанных на основании ЭЭГ-записей. Для преодоления данного ограничения в настоящем исследовании предполагается преобразовать имеющийся ЭЭГ-сигнал таким образом, чтобы увеличить сходимость между предсказаниями стадий для «преобразованной» записи и последовательностями классифицированных стадий для «первоначальной» ЭЭГ-записи, или, напротив, показать, что «новая» ЭЭГ-запись не содержит паттернов, позволяющих улучшить результат для имеющихся моделей.

В проведенном анализе данных можно выделить следующие этапы.

1. Разделение на стадии сна и расчет сходимости в пределах разных регионов

Данный этап выполнен при помощи функционала, предложенного в документации классификатора YASA. Данный алгоритм был выбран благодаря высокому показателю сходимости с ручной разметкой стадий сна клиницистами. Аналогичные алгоритмы находятся либо на стадии разработки и обучены на меньшем объеме нейрофизиологических данных, либо не обладают расширенным функционалом, отвечающим целям данного исследования (например выделение сонных веретен) [2]. Полученные на данном этапе последовательности были сопоставлены между собой. Под сходимостью в данном исследовании подразумевается коэффициент корреляции для качественных данных (меток стадий сна) в пересчете на проценты с заменой буквенных обозначений стадий на численные (например, стадии N1 соответствует число 1, стадии N2 — число 2 и т.д.). Большой процент соотносится с большей сходимостью (то есть с большей схожестью в предсказаниях между двумя последовательностями стадий).

2. Анализ сонных веретен

На данном этапе были выделены эпохи в записях на основании обнаруженных сонных веретен с последующим сравнением топографий на МЭГ- и ЭЭГ-сенсорах при помощи частотно-временного разложения.

3. Синтез ЭЭГ на основе МЭГ при помощи обратного оператора

В целях повышения показателя сходимости между предсказанными для МЭГ- и ЭЭГ-записей последовательностями была предпринята попытка видоизменения первоначального ЭЭГ-сигнала путем реконструкции источников по МЭГ-сигналу с использованием обратного оператора и последующего проецирования полученного сигнала на ЭЭГ-сенсоры. На данном этапе был произведен расчет прямой модели на основании данных о расположении источников, а также расчет обратного оператора (MNE) с его последующей нормировкой.

Литература

1. Dehghani N., Cash S. S., Halgren E. Topographical frequency dynamics within EEG and MEG sleep spindles // Clin. Neurophysiol., 2011a. Vol. 122. № 2. P. 229–235.
2. Vallat R., Walker M. P. An open-source, high-performance tool for automated sleep staging // eLife, 2021. Vol. 10. P. e70092.



УДК 616.853

Применение методов глубокого обучения для автоматического обнаружения межсудорожных разрядов на основе фильтров параметрического сопоставления кривых

Белокопытов А. С., Клеева Д. Ф., Осадчий А. Е., д. к. н.

Центр биоэлектрических интерфейсов, НИУ «Высшая школа экономики»

101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20

Asbelokopytov@edu.hse.ru

Электроэнцефалография — важный инструмент для идентификации источников межсудорожных разрядов и аномалий мозговой коры. Традиционный ручной анализ данных ЭЭГ медленный и подвержен ошибкам. В этом исследовании представлен алгоритм глубокого обучения, интегрированный с методом Fast Parametric Curve Matching (FPCM), для автоматического обнаружения спайков в данных ЭЭГ. Алгоритм достиг значительных результатов: ROC AUC 0,967, PR AUC 0,9224 и точность 0,935. Однако для достижения более высокой эффективности необходима дальнейшая оптимизация модели.

Ключевые слова: электроэнцефалография (ЭЭГ); эпилепсия; межприступные спайки; обнаружение спайков; глубокое обучение.

Введение

Электроэнцефалография (ЭЭГ) является золотым стандартом при диагностике эпилепсии. Видео-ЭЭГ-сессии, включая ночной мониторинг, помогают обнаружить эпилептическую активность, что требует дальнейшего МРТ-исследования для выявления структурных аномалий, таких как гиппокампальный склероз или опухоли. Автоматическая система обнаружения эпилептической активности через интериктальные спайки, внеприступные всплески электрической активности, значительно снижает нагрузку на клиницистов. В данной работе мы используем модель глубокого обучения, тренированную на коэффициентах, полученных с помощью алгоритма Fast Parametric Curve Matching (FPCM) [1], который использует параметрическую морфологическую модель для идентификации межприступных спайков. Эти признаки используются для обучения модели, адаптированной к ЭЭГ конкретного пациента. Вдохновленный моделью SincNet [2] FPCM уменьшает сложность и количество параметров, необходимых для обучения, улучшая извлечение признаков.

Материалы и методы

Анализировались данные ЭЭГ за период с 2022 по 2024 гг., включающие 24-часовые сессии, обработанные полосовым фильтром и прореженные. Записи были разделены на «норму» здоровых пациентов (класс 0) и межприступные спайки (класс 1), аннотированные неврологами. Для устранения дисбаланса классов использовалась аугментация. Сегментированные данные межприступных спайков и данные здоровых пациентов были выровнены и Z-стандартизированы. Модель включала коэффициенты FPCM как отдельный слой в Keras, анализируя и конкатенируя их с исходным сигналом ЭЭГ. Процесс обработки включал использование сверточных и полносвязных слоев.

Результаты

Все результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Эффективность модели при извлечении и ее обучения на различных параметрах FPCM (FP — ложноположительные результаты; FN — ложноотрицательные)

Извлекаемые параметры	ROC AUC	PR AUC	Accuracy	FP/min	FN/min
Без FPCM	0,969±0,005	0,926±0,013	0,944±0,006	2,21±0,33	1,167±0,243
c_1 FPCM-коэффициент	0,935±0,013	0,853±0,02	0,901±0,036	4,14±2,85	1,86±0,72
c_2 FPCM-коэффициент	0,937±0,008	0,854±0,021	0,926±0,007	1,3±0,75	3,18±1,09
c_3 FPCM-коэффициент	0,921±0,018	0,821±0,055	0,913±0,023	2,54±1,43	3,02±0,6
c_4 FPCM-коэффициент	0,938±0,020	0,87±0,025	0,932±0,012	1,38±1,25	2,72±1,21
c_5 FPCM-коэффициент	0,903±0,115	0,785±0,282	0,842±0,164	7,09±10,46	2,43±2,47
c_6 FPCM-коэффициент	0,938±0,023	0,868±0,039	0,935±0,011	1,17±0,21	2,77±0,63
Конкатенация всех коэффициентов	0,967±0,015	0,9224±0,021	0,935±0,012	2,25±1,76	1,66±1,05

Обучение модели на каждом коэффициенте отдельно не привело к значительному улучшению производительности, что указывает на необходимость корректировки архитектуры.

Заключение

Исследование показало, что, хотя метод FPCM подходит для извлечения признаков из данных ЭЭГ, текущая архитектура модели может требовать дальнейшей доработки. В будущих работах внимание будет сосредоточено на оптимизации архитектуры и исследовании дополнительных методов для улучшения алгоритмов автоматического обнаружения спайков.

Литература

1. Kleeva D., Soghoyan G., Komoltsev I., Sinkin M., Ossadtchi A. Fast parametric curve matching (FPCM) for automatic spike detection // Journal of Neural Engineering, 2022. 19 (3). URL: <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac682a>.
2. Hung C.-H., Wang S.-S., Wang C.-T., Fang S.-H. Using SincNet for Learning Pathological Voice Disorders // Sensors, 2022. 22 (6634). URL: <https://doi.org/10.3390/s22176634>.



УДК 621.3.049

Печатные электродные 3D-матрицы для применения в биомедицине

Жирнов С. В., Тунеков Т. А., Киреев А. К., Каршиева С. Ш., Забегалов К. Н., Лагунов В. С., Сенатов Ф. С.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
szhirnov@misis.ru*

Разработаны гибкие и растяжимые печатные электродные 3D-матрицы на основе токопроводящего полимерного композиционного материала. Для синтезированного токопроводящего материала показано отсутствие цитотоксического влияния на клетки человека.

Ключевые слова: нейроинтерфейсы; 3D-печать; композиционные материалы.

Одними из наиболее используемых экспериментальных методов нейронаук являются электрофизиологические методы: электроэнцефалография, электрокортикография, электромиография, нейростимуляция. Все эти методы требуют использования отдельных электродов или электродных матриц как для отведения электрических сигналов с органов и тканей, так и для направленной их электро-стимуляции в целях возбуждения определенных групп клеток.

На сегодняшний день золотым стандартом в электрофизиологии являются многоэлектродные матрицы на гибкой подложке (полиимид, парилен-С, полидиметилсилоксан), считывающим и проводящим элементом в которых являются тонкие металлические пленки (золото, платина), а стандартным методом производства таких матриц является литография. Однако такие электроды имеют сразу несколько фундаментальных недостатков, вытекающих из природы их материалов: отсутствие растяжимости, что приводит к их смещению относительно считываемой ткани при движениях, а также деградация металлических электродов при постоянном изгибе, что приводит к критическому падению соотношения сигнал/шум (SNR) и в конечном счете выходу устройства из строя.

Альтернативным подходом является применение композиционных электропроводящих материалов на основе углеродных наполнителей и полимерной матрицы. В таких материалах электронная проводимость реализуется за счет формирования подвижной перколяционной сети из частиц наполнителя в полимерной матрице, вследствие чего материал куда менее подвержен растрескиванию, чем металлические пленки, и в некоторых случаях может пренебрежимо мало изменять свое сопротивление при деформации.

Демонстрируется возможность аддитивного производства гибких и растяжимых многослойных мультиэлектродных матриц, которые могут быть использованы в качестве токосъемного элемента в электрофизиологических устройствах. Изучены электромеханические свойства печатных 3D-образцов проводящих филаментов, для которых показано пренебрежимо малое изменение сопротивления при одноосном растяжении до 30% деформации (область естественной деформации кожи). Изучена структура напечатанных электродов, демонстрирующая развитую поверхность, что может говорить о высокой емкости электрода на границе раздела с физиологическими жидкостями. Разработан дизайн мультиэлектродной



матрицы, а также алгоритм 3D-печати с учетом особенности технологии формирования структуры методом осаждения из раствора (LDM).

Для разработанного токопроводящего материала показано отсутствие цитотоксического эффекта для клеток человека, что говорит о возможности его применения в инвазивных устройствах.

Литература

1. Sonkusale S., Shojaei M. B., Aeron S. Materials and Processing for Flexible Bioelectronics // Flexible Bioelectronics with Power Autonomous Sensing and Data Analytics. — Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 1–25.
2. Ferguson M. et al. A critical review of microelectrode arrays and strategies for improving neural interfaces // Advanced healthcare materials, 2019. Vol. 8. № 19. P. 1900558.
3. Shen K. et al. Translational opportunities and challenges of invasive electrodes for neural interfaces // Nature Biomedical Engineering, 2023. Vol. 7. № 4. P. 424–442.



УДК 621.317.39.084.2

Исследование материалов и технологий нанесения на кожу для улучшения чувствительности и точности углеродных электронных татуировок

Касаткина К. А.¹, Мурашко Д. Т.¹, Герасименко А. Ю.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)*

*119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
kseniakor1802@gmail.com*

В работе приведено исследование технологий формирования электронных татуировок для повышения чувствительности и точности диагностики физиологических показателей организма. Приведено сравнение углеродных нанотрубок, графена для формирования функциональных слоев электронных татуировок.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графен; электрофизические свойства; датчики; электронные татуировки.

В России наблюдается растущий интерес к инновационным медицинским диагностическим технологиям. Разработка сенсорных систем в виде функциональных электропроводящих слоев, наносимых на кожу (электронные татуировки), может существенно улучшить доступность и качество диагностики для пациентов в удаленных местах от медицинских центров [1, 2]. Актуальность исследования обусловлена увеличением числа хронических заболеваний и старением населения. Электронные татуировки могут стать важным инструментом для интеграции телемедицины в российскую систему здравоохранения, позволяя врачам удаленно отслеживать состояние пациентов и оперативно реагировать на изменения физиологических показателей [3, 4].

Основной целью работы является создание биосовместимых электронных татуировок с электрофизическими свойствами, сопоставимыми с электродами для медицинской диагностики.

Предложенная технология основана на формировании композитных слоев из комбинации углеродных нанотрубок, восстановленного оксида графена и биополимера альбумина для получения перколяционных сетей в биосовместимом матриксе. Для получения заданной топологии заранее подготовленные слои равномерно осаждались на целлюлозные подложки, далее обрабатывались электромагнитным излучением и переносились на поверхность кожи.

Экспериментальные исследования продемонстрировали, что электронные татуировки обладают высокой чувствительностью для изменения сигналов с поверхности кожи, обеспечивая точность измерений до 0,1 мкВ. Электропроводность слоев составила 20–35 мСм, импеданс и угол сдвига фаз регистрировались в частотном диапазоне от 20 Гц до 1 МГц, а предел измерения сдвига достигал 10 нм. Таким образом, электронные татуировки обладают высокой чувствительностью к изменениям сигналов на поверхности кожи, обеспечивая высокую точность измерений.



Результаты работы указывают на возможность внедрения данных инновационных решений для улучшения медицинской диагностики с высокой степенью надежности и чувствительности.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Кац Е. А. Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры: родословная форм и идей. — М.: изд-во ЛКИ, 2008.
2. Каримов Х. С. Исследование датчика давления на основе композита углеродных нанотрубок и комплекса ванадия // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2012. — Т. 55. — № 7. — С. 561–566.
3. Киреев Д. Изготовление, характеристики и применение графеновых электронных татуировок // Протоколы природы, 2021. — Т. 16. — № 5. — С. 2395–2417.
4. Киреев Д. Непрерывный безманжетный мониторинг артериального давления с помощью графеновых биоимпедансных татуировок // Природные нанотехнологии, 2022. — Т. 17. — № 8. — С. 864–870.



УДК 620.3

Гибкие сухие электроды на основе углеродных нанотрубок и графена для долговременного ЭКГ-мониторинга

Куксин А. В.¹, Герасименко А. Ю.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
nix007@mail.ru*

² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
gerasimenko@bms.zone*

Разработаны гибкие сухие электроды на основе гибридных наноструктур из углеродных нанотрубок и графена, сформированных в матрице полидиметилсилоксана под воздействием лазерного излучения. Проведены экспериментальные исследования особенностей структурных и электрофизических свойств созданных электродов. Показана возможность применения электродов для измерения электрокардиограммы.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графен; лазер; электроды; электрокардиограмма.

Открытие новых аллотропных модификаций нанокремния, таких как углеродные нанотрубки и графен, обозначило широкие перспективы для развития различных областей электроники. Поиск методов создания гибридных наноструктур на основе этих двух типов углеродных наноматериалов может привести к дополнению их структурных и электрофизических особенностей и созданию высокоэффективных устройств на их основе [1, 2].

Разработана методика формирования гибких сухих электродов на основе гибридных наноструктур из углеродных нанотрубок и графена, сформированных в матрице полидиметилсилоксана под воздействием лазерного излучения.

Проведенные экспериментальные исследования особенностей процесса формирования электродов выявили, что наиболее низким сопротивлением ~ 8 кОм обладали электроды на основе гибридных наноструктур из одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и восстановленного оксида графена (ВОГ). Формирование гибридных наноструктур в виде разветвленных электропроводящих сетей из ОУНТ и ВОГ производилось импульсным лазерным воздействием с длиной волны 1064 нм.

Исследования электрофизических свойств созданных электродов продемонстрировали возможность их применения для измерения электрокардиограммы (ЭКГ). Качество регистрируемого с помощью сформированных электродов сигнала ЭКГ соотносится с качеством сигнала, регистрируемого с помощью широко распространенных Ag/AgCl-электродов. Однако отсутствие гелевого слоя на сухих ОУНТ/ВОГ-электродах выгодно отличает их от коммерческих, так как при длительном ношении они не будут подвержены ухудшению качества сигнала из-за деградации гелевого слоя.

Для изучения биосовместимости электродов на основе ОУНТ/ВОГ проводились исследования процесса выращивания на их поверхности клеток фибробластов



эмбриона человека. После инкубации наблюдалось большое количество закрепленных и выросших клеток. Клетки образовывали структуры посредством межклеточных связей. Большая плотность роста клеток подтверждает, что клетки прикреплялись к поверхности электрода и вступали в активную фазу клеточного роста. Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени биосовместимости электродов на основе ОУНТ/ВОГ, что делает их пригодными для использования в контакте с кожей.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Kumar R., Singh R. K., Dubey P. K., Singh D. P., Yadav R. M. // ACS applied materials & interfaces, 2015. Vol. 7. № 27. P. 15042–15051.
2. Kuksin A. V., Gerasimenko A. Yu., Shaman Y. P., Kitsyuk E. P., Shamanaev A. A., Sysa A. V., Eganova E. M., Slepchenkov M. M., Poliakov M. V., Pavlov A. A., Glukhova O. E. Improving the emission properties of graphene-carbon nanotube hybrid nanostructures through functionalization with BaO nanoparticles and laser treatment // Applied Surface Science, 2024. Vol. 664. P. 160222.



УДК 621.317.39.084.2

Формирование тонких пленок тензочувствительных сенсоров из электропроводящих углеродных наноструктур с лазерным воздействием для регистрации проявлений синдрома обструктивного апноэ сна

Морозова А. С.¹, Пьянов И. В.^{1,2}, Герасименко А. Ю.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
anastasiyamors@gmail.com*

² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2*

Созданы сверхрастягиваемые тонкопленочные тензочувствительные сенсоры из углеродных наноструктур методами спрей-осаждения и лазерного формирования. Описано влияние дисперсий на основе различных растворителей на электрофизические характеристики сенсоров. Предложена система для детектирования остановок дыхания.

Ключевые слова: нанокompозиты; углеродные нанотрубки; лазерное излучение; мониторинг дыхания; гибкая носимая электроника.

Гибкие тензочувствительные сенсоры, в отличие от металлических и полупроводниковых тензорезисторов, способны растягиваться до нескольких сотен процентов. Сенсоры на основе композитов углеродных нанотрубок (УНТ) с полимерными матрицами обладают повторяемостью при циклических нагрузках и долговечностью, высокой гибкостью и прочностью, а также являются сверхчувствительными к деформациям за счет высокого аспектного соотношения нанотрубок. Кроме того, УНТ обладают высокой электропроводностью благодаря туннельному эффекту и возможности создавать каркасную структуру. Поэтому тензочувствительные сенсоры на основе УНТ являются перспективными устройствами гибкой носимой электроники [1]. Одной из глобальных проблем здоровья человека на данный момент являются заболевания, вызывающие затрудненное дыхание. Синдром обструктивного апноэ сна (СОАС) представляет собой настоящую угрозу для сердечно-сосудистой системы человека [2]. СОАС тяжелой формы повышает риск смерти во сне от сердечного приступа у молодых людей на 30%. Поэтому существует необходимость создания систем амбулаторного длительного мониторинга дыхания с помощью тензочувствительных сенсоров.

Для создания тензочувствительных сенсоров разрабатывался автоматизированный метод спрей-осаждения дисперсий углеродных нанотрубок на полимерные матрицы. Матрицы из двухкомпонентного силикона изготавливались путем заливки в формы, напечатанные на 3D-принтере. Для приготовления дисперсий применялись карбоксилированные УНТ (КУНТ), диспергированные в дистиллированной воде, в изопропиловом спирте и смеси этилового спирта с помощью погружного ультразвукового зонда и ультразвуковой ванны. Лазерная обработка полученных углеродных пленок импульсным иттербиевым лазером 1064 нм

приводила к образованию перколяционных сетей УНТ и уменьшению сопротивления пленок почти в два раза.

Установлена зависимость сопротивления от количества осажденных слоев дисперсии, т.е. от толщины углеродной пленки: с увеличением количества слоев сопротивление уменьшается до значения ~ 22 кОм, после которого график выходит на плато. Полученная зависимость открывает возможность для точного контроля электрических характеристик сенсоров.

Проводилось исследование характеристик дисперсий КУНТ с различными растворителями. Наибольшей вязкостью обладала дисперсия с этиловым спиртом и дистиллированной водой — 1,27 мПа·с, а наименьшей обладала дисперсия с дистиллированной водой — 0,79 мПа·с. Таким образом, для метода спрей-осаждения наиболее подходящей является дисперсия КУНТ с этиловым спиртом и дистиллированной водой, так как образует проводящую пленку на поверхности силикона. Исследование спектров поглощения изготовленных дисперсий позволило установить, что вид растворителя не вносит значительных изменений на положение пиков поглощения в диапазоне от 300 до 1100 нм, однако наибольшим коэффициентом поглощения обладает дисперсия на основе смеси этилового спирта и дистиллированной воды.

Оценка электрофизических характеристик сенсоров на основе углеродных пленок показала, что сенсоры обладают близким к линейному поведению, которое обеспечивает стабильный отклик на деформацию сенсоров. Средний коэффициент чувствительности сенсоров составил $24 \pm 0,4$. Такие параметры сенсоров позволили создать систему мониторинга дыхания при подключении сенсоров к электронному модулю. В программе визуализации в режиме реального времени строились графики сигналов сенсоров от времени в процессе вдоха и выдоха, что позволило обнаружить моменты остановки дыхания.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Zhiran Shen, Fanmao Liu, Shuang Huang, Hao Wang, Cheng Yang, Tian Hang, Jun Tao, Wenhao Xia, Xi Xie. Progress of flexible strain sensors for physiological signal monitoring // Biosensors and Bioelectronics, 2022. Vol. 211. P. 114298.
2. Jun J. C., Swati Chopra and Schwartz A. R. Sleep apnoea // European Respiratory Review, 2016. Vol. 25. № 139. P. 12–18.



УДК 612.821

Нейроинтерфейс, дополненный механотерапией нижних конечностей и чрескожной электростимуляцией спинного мозга

Решетникова В. В.¹, к. б. н., Боброва Е. В.¹, д. б. н., Вершинина Е. А.¹, к. б. н., Гришин А. А.¹, к. ф.-м. н., Бобров П. Д.^{2,3}, к. б. н., Исаев М. Р.^{2,3}, Герасименко Ю. П.¹, д. б. н.

¹ Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН
199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 6
3069@bk.ru

² Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН
117485, г. Москва, ул. Бутлерова, 5А

³ РНИМУ им. Н. И. Пирогова Минздрава России
117513, г. Москва, ул. Островитянова, 1

Разработан и протестирован нейроинтерфейс, основанный на воображении движений нижних конечностей и дополненный механотерапией и чрескожной электростимуляцией спинного мозга. Исследование на здоровых испытуемых показало изменение ЭМГ-активности соответствующих мышц и изменение ЭЭГ-активности мозга.

Ключевые слова: нейроинтерфейс; воображение движений; механотерапия; чрескожная электростимуляция спинного мозга.

Нейроинтерфейсы — системы, позволяющие передавать команды, кодируемые активностью мозга, на внешние устройства, они могут быть использованы в области нейрореабилитации, в том числе двигательных функций [1].

На 11 здоровых волонтерах (семь женщин и четверо мужчин, 18–45 лет) разработан и протестирован нейроинтерфейс, основанный на кинестетическом воображении движений нижних конечностей (тыльное сгибание стоп) и дополненный чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга (ЧЭССМ) и механотерапией. Каждый участник эксперимента принял участие в четырех сессиях управления нейроинтерфейсом: (1) только со зрительной обратной связью, (2) с добавлением механотерапии, (3) с добавлением ЧЭССМ, (4) с добавлением механотерапии и ЧЭССМ. Перед испытуемыми была поставлена задача кинестетически вообразить тыльное сгибание правой или левой стопы либо находиться в состоянии покоя согласно инструкции, предъявляемой на экране монитора. Механотерапия, представляющая собой пассивное сгибание стоп с помощью механотренажера «Био-Кин» (ООО «Косима»), запускалась в случае успешного воображения движения испытуемым. При помощи ЧЭССМ стимулировали дорсальные корешки спинного мозга на уровне позвонков L1–L2 на расстоянии 1,5 см от средней линии позвоночника: при инструкции вообразить движения левой стопы — с левой стороны тела, при воображении движений правой стопы — с правой стороны тела. ЧЭССМ представляла собой ритмическую стимуляцию через накожные электроды импульсами длительностью 1 мс с частотой 15 Гц, заполненными высокочастотным компонентом 5 кГц.



Дисперсионный анализ показал, что при воображении как правой, так и левой стопы добавление к работе нейроинтерфейса ЧЭССМ совместно с механотерапией увеличивает точность классификации сигналов мозга, то есть приводит к большому отличию активности кортикальных сетей при воображении движений от таковой в покое. Также при добавлении как механотерапии, так и ЧЭССМ наблюдаются значимые различия между активностью мозга в разных (альфа, бета-1, бета-2) диапазонах. Стимуляционные воздействия (ЧЭССМ и механотерапия) уменьшают ЭМГ-активность антагонистов (икроножной мышцы) при воображении движения обеих стоп и активность левой передней большеберцовой мышцы (агониста) при воображении движений ведущей ноги. Эти эффекты, по-видимому, важны для формирования адекватных координационных паттернов мышечной активности, обеспечивающих лучшее следование инструкции воображать движение.

Полученные данные могут быть использованы в области нейрореабилитации движений нижних конечностей, в том числе при синдроме отвисающей стопы.

Литература

1. Young M. J., Lin D. J., Hochberg L. R. Brain-computer interfaces in neurorecovery and neurorehabilitation // *Seminars in Neurology*, 2021. Vol. 41. № 2. P. 206–216.



УДК 621.389

Реструктуризация поверхности стимулирующего электрода лазерным излучением

Круковский Н. С.¹, Герасименко А. Ю.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)*

119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

krukovskijn@inbox.ru

Реструктуризация поверхности стимулирующих электродов фемтосекундным лазерным излучением. Влияние данного метода на электрохимические характеристики электродов.

Ключевые слова: иерархическая реструктуризация; фемтосекундный лазер; стимуляция спинного мозга; электроды; фантомные боли.

Стимуляция спинного мозга может быть использована для лечения фантомных болей, поскольку обеспечивает воздействие на участки нервной системы, отвечающие за восприятие боли и ощущения в ампутированных конечностях. На данный момент существует несколько важных проблем, стоящих на пути создания эффективных и безопасных электродов для клинического применения. Одной из них является обеспечение безопасности и эффективности стимуляции при минимизации риска осложнений для доставки импульса к нервной ткани. Важной задачей служит разработка миниатюрных электродов с заданными значениями накопленного заряда и сопротивления, поскольку вместе с уменьшением размеров возрастает импеданс электрода. Необходимо нахождение правильного баланса между вышеперечисленными характеристиками наряду с биосовместимостью изделий [1, 2].

Одним из методов достижения вышеизложенных требований служит реструктуризация поверхности электрода с помощью лазерного воздействия, при которой изменяется морфология поверхности путем абляции, сублимации и плавления для придания управляемой шероховатости поверхности, что позволяет получить структуры с размерами элементов от 10^{-3} до 10^{-9} м. Использовался фемтосекундный твердотельный лазер с длиной волны 1030 нм для воздействия на электроды из сплава Pt-10Ir. Установлена связь между параметрами лазерного излучения, а именно мощности в диапазоне 0,6–3,35 Вт или плотности энергии 2–12,3 Дж/см² от получаемой иерархической структуры, и сопротивлением между электродом и биообъектом при частоте тока до 10^3 Гц. Выявлена зависимость между средней мощностью лазера и накопленным электродом зарядом. Модифицированный электрод фемтосекундным лазером обеспечивает при напряжении до 4,2 В увеличение мощности на 1 мАч/см^2 . Достигнутая структура и электрофизические параметры электродов могут обеспечить эффективное применение их для нейростимулирующих устройств.

*Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта,
соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.*



Литература

1. Shahram Amin, Wesley Seche, Nicholas May, Hongbin Choi, Pouya Tavousi, Sina Shahbazmohamadi. Femtosecond laser hierarchical surface restructuring for next generation neural interfacing electrodes and microelectrode arrays // Scientific Reports, 2022. Vol. 12. P. 1–19.
2. Nathan Dunlap, Dana B., Sulas-Kern, Peter Weddle, Usseglio-Viretta F., Laser ablation of Li-ion electrodes for fast charging: Material properties, rate capability, Li platin. and wetting // Journal of Power Sources, 2023. Vol. 537.



УДК 621.389

Микроэлектронные интерфейсы имплантируемых устройств для стимуляции нервной ткани

Кузнецова Е. А.¹, Герасименко А. Ю.^{1,2}¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**kuzya.evgen8@yandex.ru*² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России**(Сеченовский Университет)**119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2*

Приведено сравнение микроэлектронных интерфейсов для стимуляции нервной ткани из перспективных материалов по импедансу, частоте, нагреву, силе тока и гидрофильности. Предложены устройства на основе композиционных конструкций из полимеров и углеродных наноматериалов.

Ключевые слова: микроэлектронные интерфейсы; нейронные протезы; нейростимуляция.

Современная медицина неразрывно связана с микроэлектронными технологиями. В настоящее время для лечения пациентов с хронической болью и параличом используются электрические стимуляторы с нейроинтерфейсами, которые имплантируются на головной или спинной мозг, а также на периферические нервы. Экспериментальные исследования показывают, что низкоуровневая электростимуляция спинного мозга может значительно улучшить нейромоторную функцию и снизить интенсивность боли, что открывает новые возможности для немедикаментозной терапии в рамках нейрореабилитации.

Наряду с интерфейсами из благородных металлов, таких как платина, перспективными материалами для микроэлектронных интерфейсов имплантируемых устройств являются структуры из углеродных нанотрубок (УНТ) и графена [1–2]. Несмотря на хорошие электрохимические показатели, главным отрицательным моментом платиновых матриц является низкое максимальное значение инъекции заряда, превышение которого приводит к расслаиванию при сильном воздействии током [3]. Электростимуляция такими устройствами приводит к увеличению шероховатости в 3–8 раз, импеданса — в 2–4 раза и снижению угла смачивания даже при низких нагрузках в пределах 1,0–1,6 мА [4]. Это происходит ввиду окисления металла, что является главной проблемой металлических интерфейсов для хронических применений.

Материалы на основе графена и УНТ обладают высокой электропроводностью до единиц кСм/м, гибкостью и высокой прочностью при нормальной и тангенциальной нагрузках с модулем Юнга до 1 ТПа, биосовместимостью и прозрачностью в широком спектральном диапазоне [5]. Главным преимуществом графена является высокая химическая устойчивость при малой толщине (0,335 нм), а также возможность комбинирования его с различными материалами, улучшая характеристики изделий, что делает его универсальным материалом для электроники. В отличие от графена, УНТ имеют диаметр 0,4 до 40 нм с высоким аспектным соотношением длины и диаметра и могут обеспечивать создание настраиваемых перколяционных сетей при внешних воздействиях.

Анализ источников литературы позволил сформулировать совокупные параметры электродов на основе композиционных материалов из графена и УНТ для нейростимуляции:

- рабочая частота: < 1 кГц;
- нагрев: $< 37^\circ\text{C}$;
- сила тока: 60–100 мА;
- длительность импульсов: 0,5–1 мс;
- гидрофильность: краевой угол смачивания $> 40^\circ$.

Установлено, что углеродные наноструктуры с sp^2 -гибридизованной структурой за счет высокой подвижности заряда обеспечивают высокую электропроводность, теплопроводность, гибкость и биосовместимость, являясь хорошими кандидатами для создания микроэлектронных имплантируемых нейроинтерфейсов.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Alahi M. E. E., Rizu M. I., Tina F. W., Huang Z., Nag A., Afsarimanesh N. Recent Advancements in Graphene-Based Implantable Electrodes for Neural Recording/Stimulation // *Sensors*, 2023. Vol. 23. P. 9911.
2. Yuanyuan Guo, Shan Jiang, Grena B. J. B., Kimbrough I. F., Thompson E. G., Yoel Fink, Harald Sontheimer, Tatsuo Yoshinobu, Xiaoting Jia. Polymer Composite with Carbon Nanofibers Aligned during Thermal Drawing as a Microelectrode for Chronic Neural Interfaces // *ACS Nano*, 2017. Vol. 11. P. 6574–6585.
3. Ke Wang, Fishman H. A., Hongjie Dai, Harris J. S. Neural Stimulation with a Carbon Nanotube Microelectrode Array // *Nano Letters*, 2006. Vol. 6. № 9. P. 2043–2048.
4. Cavalcanti L., Filho G., Medeiros R., Diniz H., Damasceno I., Morya E., Simplicio H. Characterization of Spinal Cord Stimulation Electrode for Chronic Implant in Animal Models // *Engineering Proceedings*, 2023. Vol. 35. I. 34.
5. Kostarelos K., Vincent M., Heber C. and Garrido J. A. Graphene in the Design and Engineering of Next-Generation Neural Interfaces // *Advanced Materials*, 2017. Vol. 29. I. 42.



УДК 681.2.08

Перспективы применения кольцевого лазерного гироскопа в биомедицинских исследованиях

Сметанин И. А., к. т. н., Синельников А. О.

*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
Ismetanin.ilya@yandex.ru*

В статье описывается применение кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ) на виброподвесе для записи кардиосигналов. Представлены возможности гироскопов в диагностике сердечных и дыхательных заболеваний, спортивной медицине и неврологии. КЛГ может дополнить ЭКГ, предоставляя дополнительную информацию о частотном составе кардиосигналов.

Ключевые слова: кольцевой лазерный гироскоп; виброподвес; кардиосигнал; медицинская техника.

На сегодняшний день электрокардиограмма (ЭКГ) остается основным методом для записи кардиосигналов, используемым благодаря своей точности и распространенности в медицинской диагностике. ЭКГ регистрируется с помощью электродов, которые размещаются на теле человека вблизи сердца, и позволяет оценивать электрическую активность сердца. Однако последние исследования показывают, что гироскопы различных типов также имеют потенциал для записи кардиосигналов.

Гироскопическая кардиограмма (ГКГ), получаемая с использованием гироскопов, отличается от ЭКГ своей способностью фиксировать не только электрическую активность, но и механические колебания, связанные с сердечным циклом. Это открывает новые возможности для диагностики и мониторинга различных сердечно-сосудистых заболеваний, таких как аритмии и дисфункции клапанов. ГКГ может быть особенно полезной в случаях, когда ЭКГ не дает полного представления о состоянии сердца, например при наличии электродов или электрических помех.

В спортивной медицине гироскопы используются для более точной оценки двигательной активности спортсменов. Они позволяют анализировать параметры движений, такие как угловые скорости и ускорения, что важно для оптимизации тренировочных программ и предотвращения травм. Кроме того, в сочетании с пульсоксиметрами и другими приборами гироскопы помогают оценить физиологические реакции на физическую нагрузку и составить индивидуальные рекомендации по тренировкам.

В области неврологии гироскопы также нашли применение для регистрации неврологических проявлений, таких как треморы и двигательные расстройства. Они могут использоваться для оценки частоты и амплитуды колебаний, что помогает в классификации и мониторинге этих состояний. Анализ походки с помощью гироскопов является важным методом для диагностики болезней, связанных с нарушениями двигательных функций, таких как болезнь Паркинсона.

Современные МЭМС-гироскопы (микроэлектромеханические системы) представляют собой компактные и маломощные устройства, которые могут быть легко интегрированы в медицинские устройства и носимые технологии. Однако их точность и чувствительность могут быть недостаточными для определенных

медицинских приложений, требующих высокой точности измерений. Для таких целей кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ) на виброподвесе представляются более подходящим решением. Они обеспечивают высокую чувствительность и точность, что особенно важно для медицинских исследований и диагностики.

Целью исследования является изучение способности лазерного гироскопа ЛГК-400 фиксировать кардиосигналы и их влияние на его работу. Для этого был создан экспериментальный стенд, настроенный с учетом требований эксперимента, включая подачу кардиосигнала на гироскоп. В результате исследования были проведены запись и анализ выходных сигналов гироскопа при отсутствии и при наличии кардиосигнала. Ожидаем, что данные дадут понимание способности гироскопа регистрировать и использовать кардиосигналы для улучшения стабильности его работы.

Литература

1. Солдатенков В.А. и др. Электросейсмокардиоблок для неинвазивной диагностики заболеваний человека // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 2019. — С. 233–236.
2. Данилова Н.Н. Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования. — СПб.: ИНКАРТ, 2000.
3. Гуцол Л.О. и др. Физиологические и патофизиологические аспекты внешнего дыхания. — Иркутск: ИГМУ, 2014. — С. 7–9.
4. Лихачев С.А., Вашилин В.В., Дик С.К. Тремор: феноменология и способы регистрации. — Минск, 2010.
5. Вагнер Й.Ф. Об измерении параметров движения спортсменов с помощью гироскопов и акселерометров. Технические аспекты // Гироскопия и навигация, 2017. — Т. 25. — № 3. — С. 3–31.
6. Успенский В.М. Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов // Вестник Московской государственной академии делового администрирования. Серия: Философские, социальные и естественные науки, 2011. — № 1. — С. 104–112.



УДК 621.3.049

Инвазивная стимуляция периферических нервов как инструмент обратной связи в нейропротезной системе верхней конечности

Сокоян Г. А.¹, Пилюгин Н. С.¹, к. м. н., Биктимиров А. Р.², Синцов М. Ю.³, Лебедев М. А.⁴,

¹ Центр нейробиологии и реабилитации мозга им. Владимира Зельмана, Сколковский институт науки и технологий 121205, г. Москва, Большой Бульвар, 30, с. 1

² Дальневосточный федеральный университет 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

³ Исследовательский центр «Моторика» 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 42, стр. 1, пом. №306

⁴ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Исследования демонстрируют, что различные методы нейростимуляции могут эффективно восстанавливать тактильные и проприоцептивные ощущения у пациентов с ампутацией, а также снижать фантомные боли. В экспериментах участвовали два пациента с ампутацией верхней конечности, которым имплантировали электроды для стимуляции периферических нервов и спинного мозга. В результате тренировок пациенты смогли различать размеры объектов, управляя протезной рукой, что подтверждает потенциал использования нейростимуляции для создания мультисенсорных протезов конечностей.

Ключевые слова: ампутация; стимуляция; протезирование; периферические нервы; импланты; нейроинтерфейсы; интерфейс мозг — компьютер.

Ампутация конечностей приводит к таким разрушительным последствиям, как потеря моторных и сенсорных функций и фантомные боли в конечностях (PLP) [1]. В качестве лечения используются различные методы нейростимуляции, обеспечивающие искусственную соматосенсорную обратную связь, такие как стимуляция периферических нервов (PNS), стимуляция спинного мозга (SCS) и поверхностная электрическая стимуляция нервов (TENS) [2]. Помимо обезболивающего эффекта стимуляция способна создавать ощущения в фантомной конечности [2]. Такие испытания помогли бы выбрать наилучший метод или комбинацию методов и потенциально могли бы привести к разработке мультисенсорных протезов конечностей.

Двум пациентам с ампутацией верхней конечности на четыре недели имплантировали стимулирующие электроды, размещенные в медиальном нерве и эпидурально над спинным мозгом. PNS и SCS исследовались для каждого участника как подходы для обеспечения тактильных и проприоцептивных ощущений и подавления фантомных болей. Участники P1 и P2 — мужчины с левой трансгумеральной ампутацией. Каждый пациент подписал информированное согласие перед участием в экспериментах. Исследование было одобрено этическим комитетом Школы биомедицины Дальневосточного федерального университета (ДВФУ).

В ходе сенсорного картирования были определены характеристики тока, вызывающие проприоцептивный и тактильный ответ в фантомной кисти, что позволило включить стимуляцию в замкнутый контур управления протезом.

В этой задаче обратная связь от PNS позволяла различать размеры объектов, в то время как протезная рука захватывала цилиндрические объекты. Когда пациент инициировал захват, закрытие апертуры протеза (измеряемое с помощью энкодеров пальцев протеза) приводило к увеличению амплитуды стимуляции. Цилиндры были трех размеров: маленький (диаметром 20 мм), средний (40 мм) и большой (60 мм). Каждое тестирование захвата объектов состояло из двух сессий. В рамках сессии протезная рука хватала объект, а пациент должен был определить, является ли объект маленьким, средним или большим.

Во время сеансов испытуемые надевали повязку на глаза и шумоизолирующие наушники. При захвате они испытывали ряд вызванных ощущений, что позволило проверить, могут ли испытуемые связать уровень амплитуды PNS с размером апертуры протеза. Во время перерыва участники могли видеть протезную руку и цилиндры, и им разрешалось свободно взаимодействовать с ними.

Для каждого теста распознавания размера объекта параметры стимуляции выбирались на основе предыдущего сенсорного картирования. Использовалась пара электродов, имитирующих проприоцептивное ощущение в фантомной руке. Диапазон амплитуд стимуляции выбирался комфортным для субъекта и соответствовал значениям психометрической шкалы от 1–2 (едва различимое) до 7–8 (сильное, но комфортное восприятие). Показания энкодеров пальцев протеза обеспечивали измерение апертуры протезной руки, которая изменялась от 0% (полностью закрыта) до 100% (полностью открыта). Этот сигнал преобразовывался в амплитуду, которые в начале задания были ниже порога сенсорного восприятия.

Оба участника определяли размер объекта, захваченного протезной рукой, с точностью, превышающей уровень случайного угадывания в 33%. На первый день пациент P1 улучшил точность с 28 до 57%, на последний день точность пациента достигла 67%, а итоговый балл после тренировки составил 73,33%. До тренировки P2 не мог назвать объект, но после тренировки точность достигла 34%. В конце его точность увеличилась до 85%. В контрольной сессии без стимуляции оба участника не смогли различить размер объектов.

Мы заключаем, что способность выполнять сложные сенсомоторные задачи может быть обеспечена у пациентов с ампутацией с использованием индивидуально подобранной комбинации методов нейростимуляции. В дополнение к восстановлению ощущений нейростимуляция подавляет PLP.

Литература

1. De Nunzio A. M., Schweisfurth M. A., Ge N., Falla D., Hahne J., Gödecke K., Petzke F., Siebertz M., Dechent P., Weiss T., Flor H., Graimann B., Aszmann O. C., Farina D. Relieving phantom limb pain with multimodal sensory-motor training // *Journal of Neural Engineering*, 2018. 15(6), 066022.
2. Soghoyan G., Biktimirov A., Matvienko Y., Chekh I., Sintsov M., Lebedev M. A. Peripheral nerve stimulation enables somatosensory feedback while suppressing phantom limb pain in transradial amputees // *Brain Stimulation*, 2023. 16 (3), 756–758.



УДК 615.847 + 612.471.1

Исследование мио сигналов и разработка системы поддержки движения верхней конечности человека при нарушении проводимости

Соколов М. Е.¹, Гончарова А. В.^{1,2}, Карнуп Г. А.^{1,3}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
agoncharova@niime.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

³ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1

Реализован алгоритм адаптации миостимуляционного сигнала в режиме реального времени с тремя видами подстройки миостимуляционного сигнала. Разработан нейросетевой алгоритм с предсказанием точности двигательной активности мышц порядка 83,6%.

Ключевые слова: миостимуляция; электромиография; мышечные дисфункции.

В настоящее время одной из проблем медицины является восстановление двигательных функций руки человека при моторных дисфункциях мышц. В связи со сложным паттерном движения верхних конечностей [1] реализация адаптивных систем миостимуляции и систем поддержки при совершении свободного движения остается открытой. На базе современных достижений микроэлектроники в обработке и методах предсказания биосигналов человека [2], а также достижений зарубежных партнеров [3] предлагается новый метод адаптивной миостимуляции, основанный на сравнении референтных электромиограмм (ЭМГ) с патологической огибающей, как наиболее информативной частью ЭМГ-сигнала, и подборе сигналов стимуляции исходя из антропометрических данных пользователя для двух случаев поражения верхней конечности.

1. Алгоритм на основе зеркального отражения данных с одинаковых мышц при парезах.

По данным ЭМГ-сигнала со здоровой руки, который принимается за эталон, происходит амплитудно-частотная подстройка стимулирующих импульсов для больной руки, которыми дополняется сигнал считанной электромиограммы [4] и далее передается на электроды миостимуляции. В случае парапареза — нарушения иннервации одновременно обеих конечностей одного пояса — применяется второй сценарий.

2. Алгоритм на основе базы данных эталонных ЭМГ-значений.

При заданных параметрах (рост, вес, возраст) пациента подбирается доверительный интервал ЭМГ и наиболее физиологичный стимулирующий сигнал как разность референтного и реальных сигналов.

Для реализации алгоритма проведено исследование мышечной активности выборки из 120 здоровых человек без сопутствующих заболеваний нервно-мышечной

системы согласно разработанной методике снятия данных с пяти мышц верхней конечности и сформирована база данных амплитудных характеристик ЭМГ. Репрезентативность выборки обеспечивалась различным физиологическим состоянием объектов исследования.

Реализован алгоритм адаптивной миостимуляции для верхней конечности с нейросетевым алгоритмом на базе вариационного автоэнкодера с точностью предсказания двигательной активности 83,6% [5].

Кроме того, исследование афферентного мышечного ответа эталонных сигналов позволило сформировать максимально физиологические импульсы стимулирующих сигналов с частотой дискретизации сигнала до 0,05 в сек. Это в свою очередь позволило применить прямой метод миостимуляции непосредственно на целевую группу мышц, что меняет терапевтический эффект по сравнению с HAL-терапией [6] нарушения двигательной активности в сторону удешевления и упрощения использования.

Полученные данные могут быть применены для лечебных целей как неотъемлемая часть системного подхода восстановления нейропластичности при цереброваскулярных болезнях, травматическом поражении мотонейрона конечности и миелопатии, в качестве стимулирующей терапии при ДЦП, мышечной дистрофии, рассеянном и боковом амиотрофическом склерозе, врожденных миопатиях и нейропатиях различной этиологии.

Литература

1. Охунжанова М. З. Реабилитация больных, перенесших инсульт // Barqarorlik Va Yetakchi Tadqiqotlar Onlayn Ilmiy Jurnali, 2022. — Т. 2. — № 4. — С. 78–85.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1. — С. 2–5.
3. Горнев Е. С. и др. Анализ разработанных зарубежных изделий микросистемной техники // Микросистемная техника, 2002. — № 7. — С. 6–11.
4. Гончарова А. В., Герасименко А. Ю. Исследование электромиографических сигналов пациентов в постинсультном состоянии для разработки алгоритма // Микроэлектроника и информатика — 2023. — С. 104–111.
5. Карнуп Г. А. Исследование вариационного автоэнкодера для обработки сигналов мышц и управления экзоскелетом руки // Российский форум «Микроэлектроника-2022», 2022. — С. 718–720.
6. Cruciger O., Schildhauer T. A., Meindl R. C., Tegenthoff M., Schwenkreis P. Impact of locomotion training with a neurologic controlled hybrid assistive limb (HAL) exoskeleton on neuropathic pain and health related quality of life (HRQoL) in chronic SCI: a case study // Disability and Rehabilitation. Assistive Technology, 2014. P. 1–6. ISSN 1748-3115. DOI:10.3109/17483107.2014.981875.



УДК 611.8

Разработка системы для нейромодуляции спинного мозга методом временной интерференции

Шалаева И. Г.

Научно-технологический университет «Сириус»

354349, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус»,

Олимпийский проспект, 1

00irinsshalaeva00@gmail.com

Разработана система глубокой стимуляции спинного мозга методом временной интерференции электрических полей при эпидуральном наложении электродов. Проведено моделирование распределения полей в фантоме спинного мозга, приведены характеристики предлагаемой системы, структурное и схемотехническое решение. Адекватность моделирования оценивалась в ходе стендового эксперимента на цилиндрическом фантоме. Проведено пилотное тестирование на лабораторном животном.

Ключевые слова: стимуляция спинного мозга; временная интерференция; нейромодуляция; компьютерное моделирование.

Временная интерференция — это метод нейростимуляции, который использует генерируемые поверхностными электродами высокочастотные электрические поля для стимуляции глубоких нейронных структур, не затрагивая поверхностные, нецелевые структуры. Данный метод может иметь клиническое применение в области реабилитации после травм спинного мозга. Он может помочь в восстановлении контроля моторных и висцеральных функций, что может значительно улучшить качество жизни пациентов.

Была разработана система нейромодуляции спинного мозга методом временной интерференции электрических полей с использованием имплантируемых эпидуральных электродов. В частности, была разработана программа для моделирования распределения полей в фантоме спинного мозга и изготовлен макет системы глубокой стимуляции спинного мозга. Созданная программа упрощает определение оптимальных параметров управляющих сигналов стимулятора по критериям достижения порога возбуждения в координате целевой области и минимизации паразитной активации прочих зон. Адекватность расчетов была позднее проверена на цилиндрическом фантоме в ходе стендового эксперимента.

Задача разработки аппаратной части системы заключалась в поиске схемотехнического решения и создании системы для тестирования работоспособности прототипа и проверки точности моделирования. Генерация управляющих сигналов и регистрация экспериментальных данных осуществлялась при помощи модуля ввода/вывода аналого-цифровых сигналов E-502 (L-Card) и разработанных и изготовленных преобразователей сигналов. Один из них представлял собой ключевое звено стимулятора — выходной каскад, преобразующий сигнал перед его подачей на эпидуральные электроды. Он был разработан с учетом ряда ограничений, таких как возможная интерференция сигнала вблизи стимулирующих электродов.

Для тестирования макета и проверки результатов моделирования была изготовлена система позиционирования стимулирующих и регистрирующих электродов на поверхности и в объеме цилиндрического фантома, заполненного



физиологическим раствором, с использованием трехмерного роботизированного манипулятора, позволившая оценить распределение потенциалов в объеме.

В ходе пилотного тестирования на лабораторной крысе была экспериментально подтверждена работоспособность макета и эффективность метода временной интерференции применительно к активации глубоких структур спинного мозга, связанных с моторной функцией. Также было проведено сравнение двух паттернов стимуляции: временной интерференции синусоидальных сигналов и широтно-импульсной модулируемой временной интерференции.



УДК 621.3.049

Манжета на базе органических полупроводников для оптоэлектронной стимуляции периферических нервов

Юсуповская Е. А.¹, Марков А. Г.¹, Коновалов А. Н.^{1,2}, Пьявченко Г. А.¹,
Тельшев Д. В.^{1,3}

¹ Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)

119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
markov_a_g@staff.sechenov.ru

² Нейрохирургический центр им. Бурденко
125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработана полупроводниковая манжета для беспроводной стимуляции поврежденных периферических нервов. Представлены результаты проведения *in vitro* и *in vivo* исследований.

Ключевые слова: биоэлектроника; органические полупроводники; имплантируемое устройство; нейростимуляция.

Повреждение периферических нервов — одна из самых распространенных проблем в хирургии. Только в России в год требуется провести от 4 до 7 тысяч хирургических вмешательств в связи с такой травмой [1]. Для обеспечения более быстрого заживления была разработана специальная манжета для оптоэлектронной стимуляции на базе органического полупроводника. Она обеспечивает возможность беспроводной стимуляции нервов, возбуждая потенциал на устройстве только посредством световых импульсов от внешнего источника. Такая манжета представляет собой гибкую полиимидную пленку с золотым электродом (9 нм) и полупроводниковым пикселем, обеспечивающим стимуляцию поврежденного нерва при импульсе света 625 нм [2]. Материалы полупроводника — фталоцианин без металла H2Pc (30 нм) и N,N'-диметилпериленин3,4,9,10-тетракарбонный димид PTCDI (30 нм) — подобраны из расчета оптимальной эффективности под воздействием импульсов света с длиной волны в окне прозрачности биологических тканей.

Для обеспечения эффективной стимуляции клетки необходимо подвести до 50 мВ для возбуждения потенциала действия. Индуцируемое фото ЭДС манжеты зависит от интенсивности светового импульса и составляет около 250 мВ для однослойного полупроводника на поверхности устройства, соответственно, может обеспечить инициацию потенциала действия клеток даже на расстоянии от полупроводникового пикселя.

Эффективность такого устройства уже доказана в ходе проведения экспериментов *in vitro* на клеточных культурах *trf1* и *neuq2A*. При стимуляции плотность населения клетками увеличивалась до двух раз в сравнении с этой же клеточной культурой без проведения стимуляции. При проведении эксперимента *in vivo* на седалищном нерве крыс линии Wistar проводимость рассеченного нерва у крыс после ежедневной стимуляции в течение трех месяцев была значительно лучше, чем ушитых рассеченных нервов без проведения стимуляции.



Литература

1. Говенько Ф. С. Хирургия повреждений периферических нервов. — СПб.: Феникс, 2010. — С. 384.
2. Markov A., Gerasimenko A., Boromangnaeva A. K. et al. Multilayered organic semiconductors for high performance optoelectronic stimulation of cells // Nano Research, 2023. Vol. 16. № 4. P. 5809–5816. DOI: 10.1007/s12274-022-5130-8. EDN RWBVPC.



УДК 681.326.3

Аппаратно-программный комплекс управления прототипом стимулятора зрительного импланта

Белянин Р. И., Савюк В. О., Малето М. И.

*МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78*

В целях обеспечения работ по созданию прототипа стимулятора импульсов тока, формирующих фосфены изображения, разработано устройство управления для прототипа макета стимулятора, обеспечивающего формирование в независимых каналах последовательностей разнополярных импульсов с заданными временными характеристиками и уровнями напряжений, подключенных к электродам для имплантации. Устройство реализовано в виде конечного автомата на основе ИС программируемой логики.

Ключевые слова: конечный автомат; генератор паттернов; интерфейс SPI.

Для тестирования и работы целого ряда цифровых и аналого-цифровых устройств, представляющих синхронные конечные автоматы, требуется реализация встроенных или внешних генераторов цифровых паттернов, реализующих тактовые диаграммы (стимулы цифровых воздействий) для переключения состояний [1]. При этом в зависимости от назначения устройств количество синхронно переключаемых каналов может достигать нескольких десятков. Наиболее простой вариант технической реализации такого генератора основывается на загрузке битов кодовой последовательности в быстродействующее статическое ОЗУ и синхронизируемый внешним тактовым сигналом процесс последовательного считывания данных. Если использовать древовидное построение памяти с вложенными фрагментами повторяющихся участков тактовой диаграммы и описанием числа повторений этих фрагментов в той же памяти, то система становится универсальной, не зависящей от объема памяти. На первом уровне программируются элементарные фрагменты тестовых последовательностей, а второй уровень содержит таблицу повторений фрагментов и адреса переходов между фрагментами первого уровня. Такая организация памяти обеспечивает большое количество состояний выходных сигналов и высокую частоту смены состояний выходных сигналов. Пример такой разработки подробно описан в работе [2].

Данная работа представляет развитие подобных методов, в ней учитывается, что электрические стимулы в ряде случаев могут принимать отрицательные значения. Когда количество каналов, обеспечивающих определенную последовательность выходных битов, ограничено, для реализации генератора паттернов, видимо, достаточно создать поведенческое описание конечного автомата на основе программируемой логики. Для применения в макете прототипа стимулятора, формирующего импульсы тока с заданными параметрами, передающиеся на электроды, непосредственно контактирующие с клетками, отвечающими за обработку визуальной информации для формирования фосфенов изображения [3], разработано устройство управления для прототипа макета стимулятора, обеспечивающего формирование в независимых каналах последовательностей разнополярных импульсов с заданными временными характеристиками и уровнями напряжений, подключенных к электродам зрительного импланта.

В данной аппаратной реализации данные, считанные по протоколу UART, разделяются на несколько пакетов. Данные, определяющие временные параметры стимуляции, передаются в модуль генератора импульсов, который запускает работу загружаемого декрементного счетчика тактовых импульсов, число которых соответствует длительности импульсов или длительности интервалов между ними. Аналоговые параметры стимуляции составляют исходную информацию для модуля логики, который формирует посылки интерфейса SPI для управления внешними цифроаналоговыми преобразователями, встроенными в макет стимулятора.

В результате на основе программируемой логики семейства Artu-7 разработано устройство управления прототипом макета стимулятора зрительного импланта, в котором реализованы следующие характеристики:

- 1) время установки сигнала с ЦАП 25 нс;
- 2) длительность импульсов и пауз до 0,1 мкс;
- 3) количество разнополярных импульсов в пачке 1–150 шт.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание для университетов №ФГФЗ-2023-0005. Рег. № 123052400076-8).

Литература

1. Martinez A. L. H., Khurshheed S., Reddy S. M. URL: https://www.researchgate.net/publication/335324891_LFSR_generation_for_high_test_coverage_and_low_hardware_overhead. DOI:10.1049/iet-cdt.2019.004.
2. Горбоконенко П. А., Зинис К. А., Певцов Е. Ф., Чернокожин В. В. Программируемый генератор тестовых последовательностей // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2012. — Вып. 2 (229). — С. 97–103.
3. Liu X., Chen P., Ding X., Liu A., Li P., Sun C., Guan H. A narrative review of cortical visual prosthesis systems: the latest progress and significance of nanotechnology for the future // Ann. Transl. Med., 2022. 10 (12): 716. DOI: 10.21037/atm-22-2858.



УДК 007.52 + 621.865.8 + 615.825

Разработка управляющих биоприближенных сигналов экзоскелета руки методами ИИ

Гончарова А. В.^{1,2}, Карнуп Г. А.¹

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

agoncharova@niime.ru

Представлены результаты исследования по разработке нейросетевого адаптивного алгоритма управления экзоскелетом руки для свободного движения с предсказанием в режиме реального времени и калибровкой под амплитудные возможности мышц пользователя.

Ключевые слова: электромиография; реабилитация; поддержка движения руки; экзоскелеты; нейросетевой алгоритм.

В России в 2022 году порядка 500 тыс. человек перенесли инсульт. Их количество будет расти в среднем более чем на 5 % в год, на что влияет увеличение численности населения, среднего возраста и одновременно рост количества хронических болезней и повышение среднего уровня стресса в целом [1]. На данный момент существует острая необходимость в автоматизированной реабилитации, отсутствие которой сужает поток пациентов до 5000 человек в год.

Актуальна задача разработки реабилитационной системы для восстановления двигательной активности верхних конечностей пациентов, которые перенесли инсульт, в частности, одним из наиболее эффективных методов — с применением экзоскелета верхней конечности [2–4]. Основная причина отсутствия решения для свободного движения рукой заключается в отсутствии управляющих алгоритмов, сравнимых по вариативности и мобильности с разнообразием двигательных паттернов руки и сигналов активации мышечной системы.

В работе предлагается один из подходов к решению проблемы — использование нейросетевых методов генерации траекторий движения экзоскелета управляющими биоприближенными сигналами. Рассмотрены различные способы извлечения полезных признаков из электромиографического (ЭМГ) сигнала в целях их дальнейшей подачи в нейросетевой алгоритм. Наиболее продуктивными показали себя полосовая фильтрация частот и метод частотной выборки [5].

Для того чтобы учесть взаимное влияние параметров ЭМГ-сигналов и координатной зависимости, использована архитектура self-attention. Данный механизм позволяет оценить как влияние мод в разный момент времени в пределах одной мышцы, так и влияние мод разных мышц друг на друга. Благодаря архитектуре self-attention, применяемой к токенизированным параметрам, на математическом уровне удается учесть сразу три фактора: взаимное влияние других мышц, временные интервалы между модами и последовательность частот.

Разработан сенсор регистрации ЭМГ-сигнала с нескольких мышц, и на языке Python с применением программного пакета PyTorch реализован нейросетевой алгоритм обработки и расчета предсказания в режиме реального времени с калибровкой данных под амплитудный потенциал мышц пользователя [6].

Литература

1. Охунжанова М. З. Реабилитация больных, перенесших инсульт // Barqarorlik va Yetakchi Tadqiqotlar Onlayn Ilmiy Jurnali, 2022. Vol. 2. № 4. P. 78–85.
2. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазия? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
3. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано-и микросистемная техника, 2009. — № 1. — С. 2–5.
4. Бижанов Д. и др. Обзор и анализ экзоскелетов верхней конечности для реабилитации // Вестник КазАТК, 2023. — Т. 124. — № 1. — С. 315–323.
5. Kozuy P. S. et al. Analysis of the effectiveness of machine learning methods in the problem of gesture recognition based on the data of electromyographic signals // Computer research and modeling, 2021. Vol. 13. № 1. P. 175–194.
6. Гончарова А. В., Герасименко А. Ю. Исследование электромиографических сигналов пациентов в постинсультном состоянии для разработки алгоритма // Микроэлектроника и информатика — 2023, 2023. — С. 104–111.



УДК 616.079.5:681.5

Разработка электромиографического человеко-машинного интерфейса

Гусянцев Е. Е.¹, Зубков И. С.², Герасименко А. Ю.¹¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*² *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф*

Разработан человеко-машинный интерфейс, представляющий собой автономное устройство с электромиографическими датчиками и адаптивным алгоритмом обработки сигнала. Устройство предназначено для людей с ограниченными способностями в целях управления электронными приборами и замера сигналов с бицепса и трицепса для определения угла разгибания локтя.

Ключевые слова: электромиография; обработка сигналов; автономные носимые устройства; датчики.

Разработка человеко-машинного интерфейса имеет особую актуальность для задач реабилитации людей, у которых ограничена или отсутствует возможность управления персональным компьютером с помощью клавиатуры и мыши. Существующие компьютерные манипуляторы для людей с ограниченными возможностями имеют ряд недостатков. Такие устройства имеют высокую стоимость из-за сложной конструкции, вызывают проблемы при установке драйверов и имеют низкую совместимость с популярными операционными системами, вынуждая использовать специализированный компьютер, а их механические элементы подвержены износу.

Работа посвящена разработке электромиографического человеко-машинного интерфейса, лишённого вышеперечисленных недостатков. Интерфейс работает за счет снятия электромиографического сигнала с разработанными многоразовыми сухими электродами для датчиков, которые считывают активность бицепса, трицепса и запястья, что исключает механическое взаимодействие [1, 2]. Сигналы обрабатываются и конвертируются в команды Human Interface Device, обеспечивая совместимость с настольными и мобильными операционными системами. Время отклика не превосходит 500 мс. На стороне микроконтроллера используются алгоритмы фильтрации и анализа сигнала, частота считывания которого составляет 1 кГц. За счет выявления из сигнала дополнительных факторов, которые позволяют определить положение руки, было реализовано управление курсором мыши одной рукой с минимизацией количества датчиков до двух с шестью электродами.

Установлено, что частота электромиографического сигнала, считываемого с мышц-антагонистов бицепса и трицепса, зависит от угла разгибания локтя. Если рука разогнута в локте до упора, то частота снятого сигнала повышается. Таким образом, исследованное поведение сигнала на бицепсе и трицепсе можно применить для определения угла разгибания локтя, не используя дополнительных механических элементов. Разработанное устройство предназначено для людей с ограниченными способностями в целях управления электронными устройствами.



*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России
(проект FSMR-2024-0003).*

Литература

1. Nikitina N. A., Ryabkin D. I., Suchkova V. V., Kuksin A. V., Pyankov E. S., Ichkitidze L. P., Maksimkin A. V., Kitsyuk E. P., Gerasimenko E. A., Telyshev D. V., Bobrinetskiy I., Selishchev S. V. and Gerasimenko A. Yu. Laser-Formed Sensors with Electrically Conductive MWCNT Networks for Gesture Recognition Applications // Micromachines, 2023. Vol. 14 (6). P. 1106.
2. Gerasimenko A. Yu. et al. Interfaces Based on Laser-Structured Arrays of Carbon Nanotubes with Albumin for Electrical Stimulation of Heart Cell Growth // Polymers, 2022. Vol. 14 (9). P. 1866.



УДК 621.3.049

Предсказание слова при натуралистическом восприятии речи

Лехницкая П. А.

ООО «Нейроиконика Ассистив»;

Казанский (Приволжский) федеральный университет

lekhnitskaya.polina@gmail.com

Получена примерная модель электрофизиологической активности головного мозга при прослушивании речи. Результаты работы модели были сравнены с результатами алгоритма обработки естественного языка в схожей задаче.

Ключевые слова: mask modelling; mTRF; ЭЭГ; естественная обработка языка.

Человеческий мозг — сложная динамическая система, непрерывно обрабатывающая входную информацию. Моделирование подобной системы представляется трудной задачей, но при ее решении возможно как лучше изучить особенности работы головного мозга, так и на основе этой работы спроектировать новые способы оптимизации существующих алгоритмов, применяемых в совершенно различных областях.

Целью текущего исследования является изучение связи между функцией ответов ЭЭГ во время естественного восприятия речи, оценкой уверенности обученной языковой модели. Предполагается, что связь между сигналами ЭЭГ и естественного восприятия речи обученной языковой модели существует. Ожидаемым результатом является моделирование указанной связи.

Была предпринята попытка к изучению связи между функцией ответов ЭЭГ и пропущенными словами во время естественного восприятия речи; возможностью моделирования данной электрофизической активностью и сопоставления полученной модели с обученными языковыми моделями в схожей задаче. Статистически значимые различия были получены в электродах T3, T5 и P3. Алгоритмы классификации машинного обучения также показывают четкие различия в сигналах ЭЭГ во время понимания аудиотекста. Были получены смоделированные ответы мозга для гамма- и бета-ритмов; данная модель была сравнена с языковой моделью. Полученный результат можно рассматривать как возможное решение для разработки семантической сети для речевой реабилитации среди пациентов с некоторыми типами афазии. Одним из возможных будущих направлений исследования является изучение процессов коммуникации в этой парадигме и увеличение размера выборки.

Литература

1. Bastos A. M., Lundqvist M., Waite A. S., Kopell N., Miller E. K. Layer and rhythm specificity for predictive routing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020. 117 (49), 31459–31469.
2. Bialas Ole, Jin Dou, Edmund C. Lalor. mTRFpy: A Python package for temporal response function analysis // *Journal of Open Source Software*, 2023, 8.89: 5657.
3. Lindboom E. et al. Incorporating models of subcortical processing improves the ability to predict EEG responses to natural speech // *Hearing Research*, 2023. 433: 108767.

УДК 681.51

Система управления объемным расходом для устройств микрофлюидики

Михалин Д. А.¹, Ечестов В. В.^{1,2}, Рыжков В. В.¹, Алибеков Р. Ш.¹,
Рыжиков И. А.¹, Родионов И. А.^{1,2}

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

irodionov@bmstu.ru

² ВНИИА им. Н. Л. Духова

127030, г. Москва, ул. Суцневская, 22

Показан программно-аппаратный комплекс управления объемным расходом в канале микрофлюидного чипа. Описаны алгоритмы, позволяющие получить высокую стабильность потока. Представлен комплекс, функционирующий в разомкнутом и замкнутом по расходу режиме и развивающий точность стабилизации в 0,2 мкл/мин.

Ключевые слова: микрофлюидика; орган на чипе; управление потоками; системы автоматического управления; микрофлюидные системы управления.

Системы «орган на чипе» считаются перспективной технологией для решения задачи тестирования новых лекарств и изучения иммунных реакций на клетках. Для оперирования системами органов на чипе требуется решить задачу контроля потоков между клеточными культурами, управляя подачей и обновлением питательной среды, прецизионно дозируя расход [1]. Использование перистальтических насосов ограничено высокой нестабильностью потока вследствие дозирования жидкости роликами, а шприцевых систем — дискретным движением шагового двигателя [2]. В пневматических регуляторах вталкивающую силу разности давлений на краях микрофлюидного канала создает воздушная среда в резервуаре с жидкостью. Пневматическое управление позволяет достичь высоких точностей стабилизации объемного расхода, однако накладывает ограничения в виде необходимости внешнего источника сжатого воздуха.

Для создания портативных прецизионных микрофлюидных приборов необходимо управлять потоками жидкостей без внешнего компрессора. Подобное решение построено по принципу регулятора давления, в котором пневматический насосный элемент включен в прямую цепь управления, что позволяет избавиться от внешнего источника сжатого воздуха. Для обеспечения желаемого расхода жидкости происходит замыкание обратной связи по расходу и давлению с достаточной частотой оцифровки АЦП для синтеза алгоритмов управления на основе фильтрующей оценки производных. Разработанный комплекс позволяет стабилизировать потоки в диапазоне расходов от 0,4 до 35 мкл/мин с точностью хуже 0,2 мкл/мин по 3σ на типовом общем гидравлическом сопротивлении канала чипа порядка 10^{11} кг/м⁴ с.

Литература

1. Li M., Zhu M., Huang R. et al. Blood–brain barrier microfluidic chips and their applications // *Organs-on-a-Chip*, 2023. Vol. 5. P. 100027. DOI: 10.1016/j.ooc.2023.100027.
2. Heo Y. J. et al. Tuning-free controller to accurately regulate flow rates in a microfluidic network // *Scientific reports*, 2016. Vol. 6. № 1. P. 23273. URL: <https://doi.org/10.1038/srep23273>.



УДК 544.532.122

Композиционный материал для биомедицинской электроники**Оцупко Е. П.¹, Савельев М. С.^{1,2}, Герасименко А. Ю.^{1,2}**¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
ekaterinaotsupko@mail.ru*² *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2*

Разработана технология создания композитного биосовместимого проводящего материала на основе биополимеров с добавлением углеродных нанотрубок. Формирование осуществляется методом двухфотонной полимеризации под воздействием лазерного излучения на длине волны 1070 нм.

Ключевые слова: двухфотонная полимеризация; композиционный материал; биомедицинская электроника; углеродные нанотрубки; биополимер.

Развитие биомедицинской электроники осложнено малым числом электропроводящих материалов, обладающих биосовместимостью. В настоящее время для биоэлектроники в основном используют биоинертные металлы и кремний, однако их механические свойства сильно отличаются от свойств нативной ткани. Решением проблемы могут стать гидрогели из биосовместимых полимеров. Проводимость таких материалов обеспечивается добавлением электропроводящего синтетического полимера либо внедрением электропроводящего наполнителя. Электропроводящие гидрогели применяются в разработке биосенсоров [1], гибких микроботов [2] и клеточных каркасов для регенерации тканей [3].

В данной работе представлена технология создания композитного биосовместимого электропроводящего материала методом двухфотонной полимеризации. Микрофабрикация основана на иницировании многофотонных процессов при использовании высокоинтенсивного лазерного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне. Полимеризация представленного материала происходит под воздействием наносекундного лазерного излучения на длине волны 1064 нм.

В состав гидрогеля входят бычий сывороточный альбумин (БСА), желатин, одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) и органический краситель эозин Н. БСА был выбран как основообразующий компонент по причинам отличной биосовместимости, легкой доступности, способности к ферментативному разложению. Желатин играет роль гелеобразующего агента. Значение динамической вязкости подготовленного гидрогеля составило 4,81 мПа·с. По результатам исследования нелинейно-оптических свойств методом z-сканирования было выявлено, что увеличение вязкости образца приводит к уменьшению коэффициента преломления и, как следствие, увеличению двухфотонного поглощения образца. Это в свою очередь позволило уменьшить необходимую мощность лазерного излучения для достижения нужной энергии полимеризации. Для уменьшения пороговой экспозиции лазерного излучения в образец также добавлен эозин Н, играющий роль фотоинициатора. В качестве фотоактивирующих компонентов рассмотрены несколько органических красителей: бенгальский розовый, рибофлавин, конго красный и эозин Н. Последний из них выбран на основании результатов исследования



оптических спектров и нелинейных оптических характеристик веществ. ОУНТ выступают в роли наполнителя гидрогелевой матрицы, образуя при воздействии лазерным излучением единую объемную пронизывающую сеть, обеспечивающую электропроводность материала.

В качестве источника излучения при полимеризации использовался лазерный комплекс на основе иттербиевого лазера «ОКБ Булат». Образец помещался на стеклянную подложку, формирование структуры происходило в форме квадрата со стороной 5 мм, скорость сканирования — 240 мм/с. Характеристики лазерного излучения составили: длина волны 1070 нм, энергия 142 мкДж, частота 30 кГц и длительность импульса 100 нс.

Электрические характеристики сформированного композиционного материала исследовались четырехзондовым методом ван дер Пау. Средняя удельная электропроводность составила 21,73 мкСм·см. Представленный материал может быть использован в тканевой инженерии в качестве клеточного каркаса с электростимуляцией.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Xia S. et al. A flexible, adhesive and self-healable hydrogel-based wearable strain sensor for human motion and physiological signal monitoring // Journal of Materials Chemistry B, 2019. Vol. 7. № 30. P. 4638–4648.
2. Wang H. et al. Multimode microdimer robot for crossing tissue morphological barrier // Iscience, 2023. Vol. 26. № 11.
3. Navaei A. et al. Gold nanorod-incorporated gelatin-based conductive hydrogels for engineering cardiac tissue constructs // Acta biomaterialia, 2016. Vol. 41. P. 133–146.



УДК 004.94

Моделирование и анализ конструкции микрофлюидного чипа

Варфоломеева А. А., Паршина С. Р., Пятко Л. А.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
lapyatko@edu.hse.ru

Работа посвящена построению и анализу модели напряженно-деформированного состояния мембраны микрофлюидного чипа. Мембрана, являясь наиболее подвижным элементом чипа, подвергается механическим деформациям и напряжениям, которые способствуют накоплению микродефектов и повышению риска просачивания воздуха в его каналы. С помощью компьютерной модели исследуется влияние возможных изменений конструкции мембраны на минимизацию напряжений.

Ключевые слова: микрофлюидный чип; конечно-элементное моделирование; мембрана; ПДМС; ABAQUS.

Микрофлюидный чип — это компактное устройство, широко используемое в научных и медицинских целях для изучения биологических объектов, основанное на микрофлюидных платформах и культивировании клеток *in vitro*. Устройство представляет собой систему микроскопических каналов и полостей, позволяющую реализовывать различные операции выделения, сортировки и анализа биологической пробы. Микроканалы формируются в пластине полидиметилсилоксана (PDMS), которая наклеивается на предметное стекло. Для обеспечения движения жидкости внутри каналов используется система пневмонасосов, мембраны которых также формируются в PDMS-пластине.

В процессе эксплуатации воздух из пневмосистемы просачивается через мембраны, что приводит к образованию пузырьков внутри микрофлюидной системы, которые затрудняют прокачку по ней жидкости [1, 2]. Одной из возможных причин этого эффекта может быть износ PDMS, приводящий к появлению микродефектов, приводящих к пропуску воздуха.

В работе представлена компьютерная модель мембраны микрофлюидного чипа, которая позволяет проанализировать напряженно-деформированное состояние мембраны. Была исследована зависимость максимального напряжения от параметров мембраны, также было выявлено наличие концентраторов напряжений и предложены конструкторские решения по их устранению.

Литература

1. Michael Johnson, Greg Liddiard, Mark Eddings, Bruce Gale. Bubble inclusion and removal using PDMS membrane-based gas permeation for applications in pumping, valving and mixing in microfluidic devices // Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009. № 19. P. 1–9.
2. Lamberti A., Marassoab S. L., Cocuzzaab M. PDMS membranes with tunable gas permeability for microfluidic applications // RSC Adv., 2014. № 4. P. 61415.

УДК 004.932.72:615.47:535.8

Алгоритм обработки цифровых фотографий при визуализации вен в ближнем ИК-диапазоне

Ремизов Н. В., Якименко Д. С.

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С. П. Королева

443086, г. Самара, Московское ш., 34

erepv97@yandex.ru

Проанализированы существующие методы обработки изображений, полученных при визуализации вен в ближнем инфракрасном диапазоне. Оценена эффективность существующих методов. Составлена база данных изображений. Разработан алгоритм обработки изображений, позволяющий увеличить контрастность кровеносных сосудов относительно кожи.

Ключевые слова: визуализатор вен; ближний ИК-диапазон; OpenCV; CLANE; билатеральная фильтрация; фильтр Собеля.

Современные методы медицинской лабораторной диагностики зачастую требуют проведения венопункции, что может вызывать затруднения, когда вены не видны невооруженным глазом. Это потенциально приводит к ошибкам в заборе крови и интерпретации результатов анализов. Интерес к мониторингу вен также растет в спорте, особенно в пауэрлифтинге, где высокое давление при тяжелых подъемах может способствовать развитию варикозного расширения вен. Мониторинг изменений вен становится все более важным для спортсменов и тренеров.

Спрос на неинвазивные устройства, визуализаторы вен, растет. Хотя современные методы оптической визуализации вен имеют перспективы, существует ряд недостатков этих методов: малая глубина визуализации, малая контрастность, отсутствие стандартизированных параметров устройств. Встает задача разработки стандартизированного метода визуализации вен, включающего в себя как аппаратную стандартизацию, так и стандартизацию в вопросах обработки изображений [1].

В ходе данной работы были рассмотрены существующие подходы к обработке изображений при визуализации вен [2–4]. В частности, оценена эффективность следующих методов: методы улучшения гистограмм, линейные частотные фильтры, медианные фильтры, алгоритмы и фильтры выделения границ, вейвлет-фильтрация.

При помощи системы организации конкурсов по машинному обучению Kaggle была получена база данных, состоящая из 100 изображений предплечий различных людей, зарегистрированных в ближнем ИК-диапазоне [5]. В данной базе представлены предплечья с различными изъянами: слабой различимостью вен, татуировками, повышенной волосистостью. 70 из 100 изображений имеют разметку-маску вен.

Составлен алгоритм, включающий в себя обработку изображения путем последовательного применения следующих шагов: контрастно-ограниченная адаптивная гистограммная эквализация (CLAHE), билатеральная фильтрация, гауссов фильтр высоких частот, фильтрация Собеля по осям XY, CLANE. Работоспособность алгоритма была проверена средствами библиотеки OpenCV. Параметры алгоритма были подобраны вручную таким образом, чтобы получить высокую



различимость вен на фоне кожи рук во всей базе данных. Результаты работы алгоритма для пяти изображений из базы данных приведены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Исходные изображения



Рис. 2. Результаты работы алгоритма

Разработанный алгоритм позволяет существенно повысить контрастность кровеносных сосудов относительно окружающих тканей для всех изображений в базе данных. Быстродействие алгоритма позволяет применять обработку изображений в реальном времени, что является необходимостью для данного класса приборов.

Литература

1. Remizov N. V. et al. 3D Printed Modular Vein Viewing System Based on Differential Light Absorption in the Near Infrared Range // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, 2023. Vol. 9. № 2. P. 8.
2. Ahmed K. I., Mohamed H. H., Islam M. R. A Real Time Vein Detection System // *The Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS)*, 2018. Vol. 10. № 1. P. 9.
3. Francis M. et al. A novel technique for forearm blood vein detection and enhancement // *Biomedical Research*, 2017. Vol. 28. № 7. P. 7.
4. Ozkan H. et al. A portable multispectral vein imaging system // *Journal of electrical engineering*, 2023. Vol. 74. № 1. P. 6.
5. Forearm Veins (NIR) (Kaggle Dataset) [Electronic resource] / KAGGLE.COM: Machine Learning and Data Science Community. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/chrisnmugent/forearm-veins-nir> (дата обращения: 07.06.2024).



УДК 621.3

Исследование и разработка датчика секвенирования на базе отечественной КМОП-технологии 180 нм

Рожнов Д. А., Калёнов А. Д.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

derodens@mail.ru

Спроектирован и разработан датчик секвенирования для определения точной последовательности нуклеотидов в нити ДНК на базе отечественной КМОП-технологии 180 нм. Приведены характеристики датчика и краткое описание принципов работы.

Ключевые слова: ISFET; КМОП; ДНК; секвенирование.

Секвенирование ДНК — ключевое современное исследование в области молекулярной биологии и генетики. Секвенирование ДНК позволяет детально определить порядок нуклеотидных оснований в геноме организма, что имеет фундаментальное значение для понимания генетической информации. Секвенирование превращает биологическую молекулу в текстовый файл, который можно рассматривать и изучать подобно обычному тексту. Современные методы секвенирования порождают огромное количество коротких фрагментов, которые затем можно сравнивать с уже существующим геномом, выявляя различия в последовательности «текста» ДНК. Сравнивая ДНК различных клеток, можно найти поврежденный ген. Это важный шаг на пути к выявлению генетических заболеваний. К числу тяжелых заболеваний относят муковисцидоз, клеточная анемия и др.

Существующие методы секвенирования ДНК основаны на окрашивании с помощью флуоресцентного материала. Окрашивание — это утомительный процесс, который затрудняет проведение секвенирования в больших масштабах. Для преодоления недостатков традиционных методов секвенирования ДНК используются ионоселективные полевые транзисторы (ISFET). ISFET обеспечивает возможность получения изображения, что делает секвенирование ДНК более точным. Выбран ISFET с плавающим затвором, суть которого заключается в выносе чувствительной части датчика на поверхность пассивации интегральной схемы. Каждый ISFET расположен в собственной лунке. Форма лунки над ISFET — усеченный конус. Цепочка ДНК фрагментируется на мелкие части, образуя микробусины, которые помещаются в лунки. В процессе полимеризации преобразуется изменение pH в соответствующее выходное напряжение.

Суть передачи сигнала основывается на принципе работы приборов с зарядовой связью (ПЗС). Принцип работы ПЗС основан на изменении заряда при подаче напряжения на электрод. В устройстве ПЗС есть кремниевая подложка, на которой образован слой диэлектрика и электрод, выведенный из него. Если на него подавать высокий уровень напряжения, то носители заряда будут проникать вглубь структуры, тем самым образовывая потенциальную яму, так как дырки будут отсутствовать на границе разделов. При внедрении второго электрода в непосредственной близости к первому и подаче на него более высокого потенциала электроны будут переходить из одной ямы в другую. Основываясь на вышеупомянутой



механике, можно создать структуру из электродов, по которым сигналы будут проходить большие расстояния. Управлять данной структурой возможно благодаря всего трем шинам.

Проделана работа по изучению состояния современных технологий в сфере секвенирования, технической документации на данную тематику. Спроектированы и разработаны ISFET-структура и другие блоки, из которых в последующем создан датчик секвенирования, а также разработана тестовая структура для определения характеристик ISFET при различных вариациях, состоящая из четырех ISFET-структур с различными составляющими. Датчик секвенирования состоит из 5017600 ISFET. Напряжение питания составляет 1,8 В. Напряжение чувствительности — 500 мВ. Ток потребления составляет 112 мА. Занимаемая площадь — 249,6 мм².

Литература

1. Кузнецов А. Е. Гетерогенные биосенсоры на основе полевых структур: дис. ... док. тех. наук: 2.2.2. — Москва, Нац. исслед. ун-т МИЭТ, 2023. — С. 241.
2. Зубов В. В. Секвенирование по Ротбергу (потенциал полупроводникового секвенирования) // Биомика, 2013. — № 1–2. — С. 48–61.
3. Неизвестный С. И., Никулин О. Ю. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы // Специальная техника, 1999. — № 4.



УДК 621.3.049

Разработка интероцептивного тренинга с использованием биологической обратной связи

Русинова А. В.¹, Аксиотис В. А.¹, к. б. н., Володина М. А.^{1,2}, д. ф.-м. н.,
Осадчий А. Е.^{1,2,3,4}

¹ Центр биоэлектрических интерфейсов, НИУ ВШЭ
101000, г. Москва, Кривоколенный пер., За
arusinova@hse.ru

² Федеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБА РФ
117513, г. Москва, ул. Островитянова, 1, стр. 10

³ Научно-исследовательский институт искусственного интеллекта AIRI
123112, г. Москва, Пресненская наб., 6, стр. 2

⁴ ООО «ЛИФТ Центр»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,
ул. Нобеля, 5

5-дневный интероцептивный тренинг, основанный на методе биологической обратной связи, повышает субъективный уровень альтруизма, внимательности и осознанности участников. Эти данные открывают новые возможности для применения биомедицинской электроники в психофизиологии.

Ключевые слова: интероцепция; тренинг; физиология; эмоциональные процессы.

В последние годы тренинги, основанные на принципе биологической обратной связи, становятся все более востребованы. С их помощью можно повысить навыки саморегуляции физиологического и психоэмоционального состояния. Одним из новых направлений стали интероцептивные тренинги, в процессе прохождения которых участники учатся замечать свое сердцебиение. Ранее было показано, что после прохождения такого тренинга у участников наблюдается повышение интероцептивной точности. Причем эффект наблюдался как после прохождения четырех сессий по 40 минут [1], так и после тренинга длительностью 20 минут. В исследовании прохождение тренинга помимо повышения уровня интероцепции вызывало снижение уровня тревожности. Известно, что нарушение осознанной интероцепции наблюдается при ряде психических расстройств и соматических заболеваний. Это дает основание предположить, что повышение способности воспринимать сигналы собственного тела может уменьшить проявление симптомов этих заболеваний.

Целью нашей работы было создать интероцептивный тренинг, который приводит к повышению интероцептивной точности, и оценить его влияние на психоэмоциональное состояние участников.

Интероцептивный тренинг включал пять сессий, которые проводили ежедневно. Каждая сессия состояла из семи тренировочных блоков, в течение которых перед участниками была поставлена задача нажимать кнопку после указанного на экране количества ударов сердца (2, 3 или 4 удара). Каждый блок состоял из двух фаз по 24 испытания: в течение первой фазы через 200 мсек после обнаружения R-зубца, что соответствует времени, когда человек ощущает сокращение сердца, на экране предьявлялось анимированное изображение сердца в течение 200 мсек,



во второй фазе обратная связь о сокращении сердца не предъявлялась. Аналогичный протокол тренинга использовали в исследовании [2]. Перед каждым испытанием на экране отображалась инструкция, через сколько ударов сердца необходимо нажать на кнопку. Ответ считался правильным, если участник нажимал кнопку в течение 450 мсек после детекции R-зубца. После каждого испытания участники получали обратную связь в виде зеленой галочки (правильный ответ) или красной буквы «X» (неправильный ответ). Между фазами участникам давали письменную инструкцию в течение 30 секунд фокусировать внимание на ощущениях в своем теле, сделать глубже и медленнее вдохи и выдохи. За этим следовала 15-секундная пауза. Каждая сессия тренинга длилась примерно 40 минут.

Во время проведения тренинга первый ЭКГ-электрод крепился на среднеключичной линии с правой стороны от грудины, второй — с левой стороны по подмышечной линии.

В дальнейшем мы планируем включить в исследование 40 человек с прохождением предварительного и посттестирования. Тестирование будет включать в себя психологическое исследование, анализ interoцептивной точности, измерение ЭЭГ, ЭКГ, ЭМГ, кожно-гальванической реакции и респирометрии.

Различия в баллах психологического тестирования между группами до и после вмешательства были проанализированы с использованием дисперсионного анализа для повторных измерений (repeated measures ANOVA).

Результаты пилотного исследования, в котором приняли участие 11 человек (5 человек в экспериментальной группе, 6 — в контрольной), показали повышение субъективного уровня альтруизма ($p = 0,022$, $F = 6,805$), внимательности и осознанности в повседневной жизни ($p = 0,016$, $F = 7,738$) у участников тренинга.

С 1960-х годов известно, что физическое восприятие влияет на эмоции, а эмоциональные процессы — на поведение, особенно на принятие решений (гипотеза Антонио Дамасио). Мы предполагаем, что разработанный тренинг поможет участникам лучше понимать и регулировать внутренние сигналы своего тела. Это, в свою очередь, может увеличить их способность использовать более эффективные поведенческие стратегии.

Исследование осуществлено в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Литература

1. Sugawara A., Terasawa Yu., Katsunuma R., Sekiguchi A. Effects of interoceptive training on decision making, anxiet. and somatic symptoms // *BioPsychoSocial Medicine*, 2020. Vol. 14. № 1. P. 1–8. DOI: 10.1186/s13030-020-00179-7. EDN MOHNPB.
2. Meyerholz L., Irzinger J., Witthöft M., Gerlac A. L. and Pohl A. Contingent biofeedback outperforms other methods to enhance the accuracy of cardiac interoception: A comparison of short interventions // *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, 2019. Vol. 63. P. 12–20.



УДК 004.925.84

Проектирование трехмерных моделей матки и шейки матки на основе данных изображений УЗИ

Шалобыта Е. Н., Корнеева И. П.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

*197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
enshalobyta@stud.etu.ru*

Разработана методика получения параметрических твердотельных моделей матки и шейки матки по данным ультразвуковых изображений. Исследован потенциал их применения для выявления факторов наступления неблагоприятных перинатальных исходов.

Ключевые слова: параметрическое моделирование; твердотельные модели; беременность; преждевременные роды; биомеханика тканей.

Понимание тканевой биомеханики репродуктивных процессов играет ключевую роль в изучении нормального протекания беременности и выявления возможных аномалий на всех ее сроках. Несмотря на важность вопроса и растущий интерес к нему ученых и медиков, на сегодняшний день по-прежнему наблюдается нехватка клинических и фундаментальных научных исследований в данной области, что существенно осложняет задачу предупреждения и профилактики наступления патологических состояний.

Одной из доступных альтернатив прямым исследованиям физиологии беременности, проведение которых значительно ограничено особенностями ее протекания, является компьютерное 3D-моделирование. Создание параметрических твердотельных моделей обосновано, с одной стороны, их удобством (одна исходная модель может быть легко адаптирована под индивидуальные параметры), с другой стороны, их простотой и наглядностью, а также возможностью преобразования в числовые модели, пригодные для биомеханического моделирования.

Разработанный метод получения параметрических моделей основан на анализе изображений, полученных при проведении ультразвукового исследования (УЗИ) беременных женщин. Данные УЗИ являются более предпочтительными исключительно из практических соображений — как относительно недорогого и широко распространенного исследования с низким уровнем риска. Для получения всех необходимых анатомических параметров, используемых при построении трехмерных моделей, используется несколько изображений УЗИ, выполненных в разных (аксиальной и сагиттальной) плоскостях и при разном положении тела пациента. В число измеряемых параметров входят: диаметр матки, взятый в разных направлениях, толщина стенок матки, а также длина шейки матки (диаметр цервикального канала) — основной на сегодняшний день показатель, использующийся для выявления пациентов с высоким уровнем вероятности наступления неблагоприятного перинатального исхода [1].

Полученные трехмерные модели в дальнейшем могут быть преобразованы в численные для оценки механических нагрузок, расчета напряжения и деформации тканей. Именно по этим данным возможно определить анатомические



и механические изменения, подходящие для прогнозирования исхода беременности и предупреждения развития патологий.

Метод параметрического моделирования дает возможность быстрого создания твердотельных моделей матки и шейки матки по индивидуальным значениям показателей для каждого отдельного случая. Вместе с тем он включает в себя ряд упрощений, делающих его реализацию более доступной в ограниченных условиях [2].

Хотя метод не является строгим отражением естественной анатомии матки и шейки матки во время беременности, тем не менее он может стать основой для проведения исследований по расчету механической нагрузки и напряжения в тканях матки и шейки матки во время беременности.

Создание трехмерных моделей репродуктивных органов (матки и шейки матки) в период гестации позволяет получить более полное представление об их эволюции на протяжении беременности, изучить структурные изменения в окружающих органы тканей и способствует улучшению понимания общей биомеханики процесса. Все это в совокупности поможет разработать рациональные методы лечения патологий беременности, а также откроет новые возможности для разработки биомедицинских устройств, облегчающих прогнозирование развития неблагоприятных перинатальных исходов.

Литература

1. Louwagie E. M. et al. Longitudinal ultrasonic dimensions and parametric solid models of the gravid uterus and cervix // PLoS ONE, 2021. 16(1): e0242118.
2. Yoshida K. Bioengineering and the cervix: The past, curren. and future for addressing preterm birth // Current Research in Physiology, 2023. Vol. 6.

УДК 004.45

Анализ портируемости современного ПО для запуска микросервисных приложений и аналитики данных на платформу RISC-V

Степина Н. О., Шемаев К. Е., Шеремет С. С., Крючкова К. Ю., Ребдев П. А., Мороз Д. Д., Аверич В. Е., Черепанов Н. И.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б*

Подготовка экспериментального стенда к запуску приложений с микросервисной архитектурой на основе компьютеров с процессорной архитектурой RISC-V. Инсталляция программного обеспечения для портирования микросервисов.

Ключевые слова: RISC-V; операционные системы; аппаратное обеспечение; микросервисы; портирование; экспериментальный стенд.

Введение

Микросервисные архитектуры становятся все более популярными в современных приложениях. Такие приложения могут демонстрировать различную эффективность в зависимости от аппаратной платформы. В связи с этим становится актуальной задача портирования ПО на различные платформы, в частности на перспективную архитектуру RISC-V. Данная архитектура отличается от ARM и x86 тем, что является открытой для использования. Архитектуры RISC имеют ряд преимуществ по сравнению с CISC [1]. Вот некоторые из них:

- производительность;
- энергоэффективность;
- простота программирования;
- меньший объем кода.

Постановка задачи

Перед нами стоит задача исследования портируемости микросервисных приложений на платформу RISC-V. Для проведения данного исследования предполагается произвести подготовку аппаратного и программного обеспечения:

- собрать экспериментальный стенд, основанный на двух компьютерах на платах *Lichee Pi 4A*;
- выбрать и установить ОС для стенда;
- установить окружение для работы над поставленной задачей;
- тестирование стенда в различных сценариях.

Для сборки тестового стенда необходимо воспользоваться комплектом сборки для двух ПК, в каждом из которых содержится:

- Lichee pi 4A;
- корпус с Wi-Fi-антенной;
- кулер с термоинтерфейсом;
- комплектный дисплей;
- JTAG-отладчик;
- стойка для дисплея.



Выбор ОС

Следующий важный этап — выбор ОС. Был проведен сравнительный анализ операционных систем по следующим критериям [2]:

- поддержка архитектуры RISC-V;
- ОС общего назначения;
- поддержка контейнеризации и многопоточности;
- открытый исходный код;
- популярность как среди серверов, так и обычных пользователей ПК.

В результате выбор остановился на Linux Debian, потому что его рекомендует производитель Lichee Pi 4A для своей платы, а также потому, что он открытый и поддерживает контейнеризацию.

Установка окружения

После установки ОС необходимо настроить и протестировать окружение, отвечающее нашей цели [3]:

- GCC — для установки ПО;
- Docker — для контейнеризации микросервисов;
- K3s — для оркестрации контейнеров.

Пакеты были установлены и протестированы запуском простейших программ.

Проблемы и перспективы

В ходе работы мы столкнулись с тем, что MIPI DSI не воспринимается системой. Чтобы это исправить, мы поставили по умолчанию этот видеовыход в конфигурационный файл `/boot/extlinux/extlinux.conf`.

Но самая главная проблема была связана с перенаправлением трафика: у нас получилось установить и запустить K3s, однако мы обнаружили, что не имеем доступ к сервисам, развернутым внутри него. Выяснилось, что трафик не перенаправляется извне к сервисам, между сервисами (в частности системными) и между узлами кластера. Появилось предположение, что проблема связана с самим дистрибутивом K3s, так как официальной поддержки RISC-V нет. Однако более глубокий анализ показал, что правила iptables (встроенный брандмауэр Linux) для оркестратора не создаются, а значит, корень проблемы может лежать в области ядра Linux. Проблема находится на стадии решения.

В перспективе мы собираемся решить проблему с оркестратором контейнеров. Далее изучить архитектуры микросервисных приложений и их требований к аппаратной среде. Выбрать три примера таких приложений. После чего провести эксперимент, сравнив их работу на архитектурах RISC-V и x86 по ряду метрик. На основе полученных данных проанализировать преимущества и недостатки работы микросервисов на платформе RISC-V.

Литература

1. Фролов В.А., Галактионов В.А., Санжаров В.В., Исследование технологии RISC-V. — URL: https://www.ispras.ru/proceedings/docs/2020/32/2/isp_32_2020_2_81.pdf (дата обращения: 03.03.2024).
2. Жданов А. Операционные системы реального времени, 1999. — URL: <https://www.itweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=50257>.
3. Yandex Cloud блог/статья: Как устроен Docker и почему он популярен, 2022. — URL: https://yandex.cloud/ru/blog/posts/2022/03/docker-containers?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F.



УДК 621.3.049

Опыт разработки цифровых ИС на основе открытого ПО с использованием отечественных библиотек компонентов

Пятак И. М., Антропов В. А., к. т. н., Лешуков Я. А.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б*

Исследована возможность реализации цифровых интегральных схем на основе отечественной библиотеки стандартных ячеек с использованием открытого ПО для разработки цифровых интегральных схем. Описаны шаги по интегрированию отечественной библиотеки компонентов в открытое ПО, замеченные проблемы и их возможные решения. Представлены примеры полученных топологий для тестовых HDL-описаний.

Ключевые слова: открытое программное обеспечение; цифровая интегральная схема; логический синтез; статический временной анализ; размещение и трассировка; топология интегральной схемы.

На сегодняшний день открытое некоммерческое ПО широко используется во многих сферах деятельности — от прикладных исследований до коммерческой разработки. Открытое программное обеспечение имеет ряд преимуществ, к примеру возможность модификации исходного кода ПО для конкретных применений, добавление нового функционала и т. п. Однако в сфере, связанной с разработкой цифровых интегральных схем, выбор открытого ПО по-прежнему не слишком велик.

В ходе работы было рассмотрено открытое ПО для основных стадий физической разработки цифровых интегральных схем: логический синтез (англ. logic synthesis), статический временной анализ (англ. static timing analysis, STA) и построение топологии на кристалле, которое включает в себя размещение и трассировку (англ. place and route, PaR), экстракцию паразитных параметров, экспорт GDSII-файла и проверки полученной топологии (DRC, LVS и т. д.). Также было рассмотрено открытое ПО для проверки формальной эквивалентности и конвертации кода на SystemVerilog в код на Verilog HDL.

В ходе анализа открытых источников были выбраны два кандидата для дальнейшей работы: ПО OpenLane [1] и ПО OpenROAD-Flow-Scripts [2], в них используется практически одинаковое ПО для отдельных стадий физической разработки ИС, но OpenROAD-Flow-Scripts имеет более подробную документацию по добавлению библиотек компонентов, что было крайне важно для дальнейшей работы.

Далее были проделаны шаги по интегрированию отечественной библиотеки компонентов в ПО OpenROAD-Flow-Scripts. Основной проблемой при интегрировании библиотеки компонентов является отсутствие правил для экстракции паразитных параметров и проверок DRC и LVS для рассматриваемого открытого ПО. Также отсутствует нативная поддержка System Verilog. Данные проблемы были проанализированы, предложены способы их решения.

Результатом работы являются топологии тестовых HDL-описаний, полученные в рассматриваемом открытом ПО OpenROAD-Flow-Scripts, в том числе для отечественного открытого RISC-V микропроцессорного ядра Syntacore «SCR1». Для оценки качества полученных топологий некоторые шаги разработки (DRC, LVS и STA) были проведены также в коммерческом ПО от Cadence Design Systems.



Литература

1. OpenLane. URL: <https://github.com/The-OpenROAD-Project/OpenLane>.
2. OpenROAD-Flow-Scripts. URL: <https://github.com/The-OpenROAD-Project/OpenROAD-flow-scripts>.



УДК 004.2

Учебный процессор CdM-16

Репин Н. Н., Храповицкий Т. А., Вашурин Д. В., Иртегов Д. В.,
Власов А. А., к. т. н.

Новосибирский национальный исследовательский государственный
университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
n.repin@g.nsu.ru

Разработана архитектура CdM-16 и набор инструментов, позволяющий компилировать и отлаживать программы на ассемблере и Си. Система апробирована на курсе «Цифровые платформы» направления подготовки «Компьютерные науки и системотехника» (КНиС) факультета информационных технологий (ФИТ) НГУ.

Ключевые слова: CdM-16; CdM-8; процессор; архитектура; системное программирование; цифровые платформы; образование.

На первом курсе КНиС ФИТ НГУ читается курс «Цифровые платформы», на котором студенты изучают основы архитектуры ЭВМ, цифровой электроники и низкоуровневого программирования [1].

Обучающиеся в течение года работают с архитектурой CdM-8 — это простой 8-битный процессор, созданный в образовательных целях. В конце года студенты выполняют проект — на основе процессора разрабатывают аппаратное обеспечение, а затем пишут для него программную часть. Проекты выполняются в среде Logisim [2] — это симулятор цифровых схем, одними из главных достоинств которого являются наглядность и интерактивность. Пользователи могут визуально наблюдать структуру и состояние схем вплоть до уровня логических вентилей. Благодаря этому, например, можно посмотреть, что происходит внутри процессора во время выполнения программы.

CdM-8 дает хорошее базовое понимание, но в нем нет многих концепций, которые применяются в настоящих процессорах, к тому же 8-битная архитектура накладывает серьезные ограничения на размер и сложность проекта, выполняемого в рамках курса.

Был разработан процессор CdM-16. Это 16-битная архитектура с более сложным устройством. Изучая ее, студенты могут познакомиться с такими концепциями, как аппаратные исключения, таблица векторов прерываний, разные режимы адресации, относительные инструкции перехода, выровненный доступ к памяти. Благодаря 16-битной адресации и более разнообразному набору команд процессор позволяет реализовывать более сложные и интересные проекты.

Также была разработана новая инфраструктура — ассемблер, компоновщик и дизассемблер. Разработан новый формат объектных файлов, сохраняющий совместимость с оригинальным форматом. В качестве текстового редактора используется VS Code, для которого разработано расширение, поддерживающее отладку, подсветку синтаксиса и автодополнение для ассемблера. Разработан протокол, по которому клиент может отлаживать программу в выбранной среде выполнения. Инструменты поддерживают все процессоры из линейки и могут быть легко переадресованы на новые.



В дополнение к этому ведется разработка бэкенда LLVM для CdM-16 [4], что позволит, в частности, компилировать программы на языке C под эту архитектуру.

Используя систему со средой выполнения Logisim, пользователи имеют возможность отлаживать программную часть, при этом визуально наблюдая состояние аппаратной системы, на которой она выполняется.

По результатам работы создан программный пакет [3], в состав которого на текущий момент входят:

- процессоры CdM-16 (эмулятор, схема) и CdM-8/8e (схема);
- набор инструментов (ассемблер, компоновщик, дизассемблер, компилятор микрокода);
- отладчик для среды выполнения Logisim;
- расширение для VS Code.

Система была полностью развернута в 2023–2024 учебном году. Многие студенты выбрали новый процессор как основу для итоговых проектов. По результатам опроса, большинство обучающихся было удовлетворено процессором и инструментами разработки. По их отзывам, его использование позволило выполнить более сложные проекты и разобраться в аппаратной реализации современных вычислительных устройств.

В будущем планируется реализация Verilog-модели процессора. Также ведется работа над компьютером на базе модифицированной архитектуры CdM-16, на котором можно будет изучать принципы работы ОС. В рамках этого уже существуют прототипы модифицированной архитектуры CdM-16e, диспетчера памяти и контроллера прямого доступа к памяти.

Литература

1. Лаврентьев М. М., Шафаренко А. В., Держо М. А. Франшиза бакалавриата компьютерных наук в Новосибирском государственном университете // Наука и технологии Сибири, 2023. — № 3 (10). — С. 16–21.
2. Logisim: офиц. сайт. — URL: <http://www.cburch.com/logisim/ru/index.html> (дата обращения: 08.07.2024).
3. Репозиторий cdm-devkit: офиц. сайт. — URL: <https://github.com/cdm-processors/cdm-devkit> (дата обращения: 08.07.2024).
4. Репозиторий бэкенда LLVM для CdM-16: офиц. сайт. — URL: <https://github.com/leadfrogrommer/llvm-project-cdm> (дата обращения: 08.07.2024).



УДК 004.451.642

Поддержка запуска ОС Embox в Supervisor-режиме RISC-V

Фролов Т. С.

*Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
tima1911@yandex.ru*

В ОС Embox добавлена возможность запуска в Supervisor-режиме процессора архитектуры RISC-V с использованием OpenSBI.

Ключевые слова: RISC-V; Embox; операционные системы.

RISC-V — набирающая популярность открытая архитектура. В ней есть несколько режимов привилегий, в которых может работать исполняемый код M (Machine), S (Supervisor), U (User). В зависимости от режима, в котором работает код, у него может быть или не быть доступ к тем или иным аппаратным функциям.

Согласно стандарту [1], аппаратные потоки процессора запускаются в M-режиме, в котором у запущенного кода есть доступ ко всем аппаратным функциям процессора. Далее запущенный код может перевести поток в другой режим привилегий. Пользовательские приложения запускаются в U-режиме, а S-режим может быть использован для ядра ОС.

В S-режиме у запущенного кода нет доступа к части аппаратных возможностей процессора, которые необходимы многим ОС для корректной работы. Для получения доступа к этой функциональности необходимо взаимодействовать с прошивкой, запущенной в M-режиме. OpenSBI [2] — рекомендованный интерфейс для взаимодействия платформозависимой прошивки, запущенной в M-режиме, с операционной системой, запущенной в S-режиме.

Embox — операционная система реального времени с открытым исходным кодом. В ОС Embox есть поддержка многих процессорных архитектур (x86, arm и т. д.), однако поддержка RISC-V ограничена: поддерживается запуск только в M-режиме процессора, что ограничивает возможность применения: на некоторых платах производитель предполагает, что операционная система запускается в S-режиме.

В данной работе добавлена поддержка запуска ОС Embox в S-режиме процессора архитектуры RISC-V с использованием OpenSBI [3]:

- добавлен параметр для сборки Embox в S-режим процессора, при включении которого:
 - все инструкции и регистры M-режима заменяются на инструкции и регистры S-режима;
 - взаимодействие с функциями процессора, недоступными в S-режиме (получение идентификатора аппаратного потока, настройка таймера) происходит через OpenSBI;
- добавлена возможность конфигурации PLIC, определяющей области памяти, по которым ОС взаимодействует с PLIC.

Литература

1. The RISC-V Instruction Set Manual, Volume II: Privileged Architecture, Document Version 20211203. Editors Andrew Waterman, Krste Asanovi. and John Hauser, RISC-V International, December 2021. URL: <https://github.com/riscv/riscv-isa-manual/releases/tag/Priv-v1.12> (дата обращения: 09.07.2024).



2. RISC-V Supervisor Binary Interface Specification, March 22, 2022. URL: <https://github.com/riscv-non-isa/riscv-sbi-doc/releases/tag/v1.0.0> (дата обращения: 09.07.2024).
3. Embox. URL: <https://github.com/embox/embox/pull/3039> (дата обращения: 09.07.2024).



УДК 004.382.4

Разработка системы освещения и моторизованного предметного столика для электронного микроскопа с использованием одноплатного компьютера на базе архитектуры RISC-V

Симонова Д. В., Шагалова П. А.

Нижегородский государственный технический университет

им. П. Е. Алексеева

603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

kotik-da@yandex.ru, polli-shagalova@yandex.ru

Разработана система освещения и моторизованный предметный столик для электронного микроскопа с использованием одноплатного компьютера MangoPi MQ PRO D1 на базе архитектуры RISC-V. Приведено описание предлагаемого решения и электронная схема системы.

Ключевые слова: архитектура RISC-V; интерфейс GPIO; электронный микроскоп.

На сегодняшний день разработка устройств, использующих процессорную архитектуру RISC-V, является одним из перспективных направлений микроэлектроники, поскольку данная архитектура обладает рядом преимуществ [1]:

- масштабируемость — позволяет адаптировать процессоры под различные требования;
- открытость — предоставляет свободный доступ к данным об архитектуре;
- модульность — дает возможность использовать и создавать расширения;
- эффективность — позволяет создавать производительные решения.

В области микроскопии при обработке и анализе изображений с помощью электронного микроскопа важным фактором обеспечения хорошего качества изображения является освещение исследуемого образца.

В данной работе для реализации системы освещения и моторизованного предметного столика для электронного микроскопа был выбран микрокомпьютер MangoPi MQ PRO D1, использующий архитектуру RISC-V, обладающий малыми размерами и имеющий 40-контактный разъем GPIO, используемый нами для управления разрабатываемыми модулями [2].

Разработанная система состоит из двух основных модулей — освещения и передвижения предметного столика. Схема модулей была спроектирована и протестирована с использованием инструмента Proteus Design Suite. Собран каждый модуль на беспаячной макетной плате на 400 контактов. Схема подключения разработанных модулей представлена на рис. 1.

В модуль контроля уровня освещенности входят два резистора (220 Ом), потенциометр (WH148 50 кОм) и светодиод (12 Лм). Необходимая яркость светодиода настраивается с помощью потенциометра, однако рассматривается подключение к модулю датчика освещенности и использование нейронной сети для анализа качества изображения и определения необходимых настроек освещения. Модуль использует контакты GPIO — номера 18 для ввода и 22 для вывода, систему можно выключить программным управлением из ввода платы.

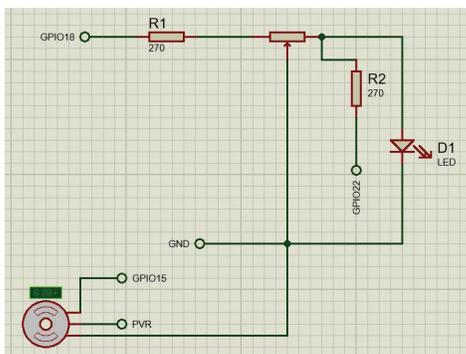


Рис. 1. Электрическая схема подключения модулей освещенности и передвижения к плате

Модуль передвижения предметного столика включает в себя сервопривод SG90, полностью управляемый с помощью программного обеспечения, собранного с помощью кросс-компилятора на более производительной машине. Пользователь указывает направление перемещения и расстояние, после чего соответствующий сервопривод двигает предметный столик. Код написан на Python с использованием библиотеки `Igpiio`. Для управления используется контакт GPIO — номер 15.

В результате работы была спроектирована система освещения и моторизованного предметного столика для электронного микроскопа, отличающаяся простотой масштабирования и модернизации и использующая микрокомпьютер с современной архитектурой процессора RISC-V.

Литература

1. Харрис С.Л., Харрис Д. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: RISC-V / Ред. А. Ю. Романов. Перев. А. Ю. Романова, В. С. Яценкова. — М.: ДМК Пресс, 2021. — С. 810.
2. Шагурин И. И. Современные микроконтроллеры и микропроцессоры. — М.: Горячая линия — Телеком, 2004. — С. 952.



УДК 004.416

Разработка расширения clang-tidy для автоматического преобразования векторных оптимизаций библиотеки OpenCV

Голубев Д. Е., Шагалова П. А.

Нижегородский государственный технический университет

им. Р. Е. Алексеева

603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

danil_golubev_02@mail.ru, polli-shagalova@yandex.ru

Разработаны плагины для clang-tidy, позволяющие автоматически преобразовывать векторные оптимизации в исходном коде библиотеки OpenCV, не прибегая к ручному рефакторингу.

Ключевые слова: LLVM; Clang-Tidy; векторная оптимизация; автоматический рефакторинг.

Автоматизация процессов в разработке программного обеспечения имеет важную роль. Автоматический рефакторинг направлен на улучшение качества кода, его читаемости и удобства сопровождения без изменения его поведения, он помогает избежать ошибок, связанных с человеческим фактором, и ускоряет процесс разработки.

В работе представлено программное решение для преобразования векторных оптимизаций библиотеки OpenCV с использованием открытого статического анализатора кода clang-tidy, являющегося частью системы компиляции llvm и необходимого для анализа языков C/C++/Objective-C [1].

Clang-Tidy анализирует код на уровне абстрактного синтаксического дерева (AST) [2] и препроцессора, используя инфраструктуру компилятора clang.

Современные компиляторы активно оптимизируют код для повышения производительности при соответствующей настройке параметров компиляции. Одним из инструментов оптимизации является векторизация.

Векторная оптимизация позволяет увеличить производительность программы за счет использования векторных операций. Такие операции выполняются над массивами данных, уменьшая количество операций и повышая быстродействие. Применение специализированных векторных инструкций позволяет значительно поднять скорость обработки блоков данных [3].

При разработке программного решения для автоматизации преобразования векторных оптимизаций библиотеки OpenCV были решены следующие задачи:

- анализ исходного кода программы, написанной на языке программирования C++, представленной в виде AST;
- знакомство с инфраструктурой LLVM/Clang-Tidy. Конфигурация и генерация сборки LLVM/Clang с помощью утилиты CMake [4];
- создание простого скрипта-плагина для clang-tidy с помощью внутреннего rpython-скрипта;
- добавление элементарного образца исправления кода и тестирование его функциональности;
- реализация и применение предупреждения и исправления на одном определенном файле;



- реализация плагинов, осуществляющих замену операторов на соответствующие функции `add`, `mul`, `sub`, `div`; замену `compile-time` `planes` на `run-time` вариант; замену массивов с типом векторный регистр на набор переменных с индексами.

Для проверки разработанного решения создано тестовое приложение, использующее функции библиотеки `OpenCV`. Приложение собрано под архитектуру RISC-V с использованием кросс-компилятора. На эмуляторе `qemu` настроена виртуальная машина с архитектурой RISC-V (и поддержкой RISC-V RVV scalable). Произведен замер скорости выполнения приложения на данной архитектуре. Результат работы плагинов был внедрен в исходный код библиотеки `OpenCV`, выполнена повторная сборка тестового приложения, запуск и измерение производительности.

Литература

1. Бучацкий Р. А., Чуркин Я. А., Чибисов К. А. Проверка программ на соответствие стандарту MISRA C с использованием инфраструктуры CLANG // Труды института системного программирования РАН, 2020.
2. Introduction to the Clang AST. URL: <https://clang.llvm.org/docs/IntroductionToTheClangAST.html>.
3. Барлит А. В. Увеличение быстродействия вычислений в полях Галуа с помощью векторных инструкций // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2020): Сборник трудов XVIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, 2020. — С. 166–169.
4. Дубров Д. В. Система построения проектов CMake: Учебник. — Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. — 419 с.



УДК 004.382.4

Разработка интеллектуальной системы видеоаналитики на основе платформы RISC-V с использованием SiPeed Lichee Pi 4

Некоркин Д. С., Никоноров С. А.

Нижегородский государственный технический университет

им. П. Е. Алексеева

603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

dimnekor@mail.ru, sergionik03@gmail.com

Интеллектуальные системы видеоаналитики играют ключевую роль в современных технологиях безопасности, наблюдения и автоматизации. В работе предложена разработка системы на основе открытой платформы RISC-V для решения задачи обнаружения и отслеживания объектов на видеопотоке.

Ключевые слова: архитектура RISC-V; SiPeed Lichee Pi 4; модели YOLOv7-Tiny; Naag; LBP.

SiPeed Lichee Pi 4 представляет собой одноплатный компьютер, основанный на процессоре Xuantie C910 (RV64GCV) с четырьмя вычислительными ядрами RISC-V, которые могут работать на частоте до 2,5 ГГц. Этот компьютер также включает нейропроцессорный блок (NPU) с производительностью до 4 TOPS для задач искусственного интеллекта, энергоэффективное ядро Xuantie E902, графический блок Imagination 3D с производительностью до 50 Гфлопс и DSP Xuantie C906. Таким образом, Lichee Pi 4 предлагает мощную и гибкую платформу для широкого спектра приложений, включая IoT, машинное обучение, графику и обработку сигналов.

Создаваемая система разделена на несколько ключевых компонентов: вычислительное ядро RISC-V [1], модули ввода-вывода, контроллеры периферийных устройств (камера OV5640, HDMI-дисплей). Взаимодействие между модулями и подключение к периферийным устройствам реализованы через различные интерфейсы и протоколы (GPIO, SPI, I2C, UART), обеспечивающие эффективную передачу данных между различными частями системы. Операционная система Linux [2] была установлена на платформу, используя U-Boot для инициализации периферийных устройств и загрузки ядра Linux в память DDR3.

Для обнаружения и отслеживания движущихся объектов были рассмотрены три модели: YOLOv7-Tiny [3], Naag [4] и LBP. После сравнения производительности моделей на платформе была выбрана модель LBP благодаря высокой скорости обработки данных.

Для повышения эффективности системы в условиях ограниченных аппаратных ресурсов была применена технология усреднения видеопотока (video downsampling). Она позволяет значительно снизить объем обработки данных на один кадр. Это позволило сократить потребление ресурсов и повысить общую производительность системы.

Результаты исследования показали высокую эффективность системы видеоаналитики на основе платформы RISC-V с использованием SiPeed Lichee Pi 4. Модель LBP для обнаружения объектов обеспечила быструю обработку данных,



а технология видеоусреднения снизила нагрузку на ресурсы. Дальнейшие улучшения могут включать оптимизацию алгоритмов и расширение функциональности для более широкого спектра приложений в области видеоаналитики, безопасности и автоматизации.

Литература

1. Харрис С.Л. Харрис Д. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: RISC-V / Ред. А. Ю. Романов. Перев. А. Ю. Романова, В. С. Яценкова. — М.: ДМК Пресс, 2021.
2. Мауэрер В. Профессиональная архитектура ядра Linux // Wrox, 2008.
3. YOLOv7 Анализ модели угроз и кода. — URL: <https://www.trailofbits.com/documents/2023-10-yolov7-securityreview.pdf>.
4. Viola P., Jones M. Быстрое обнаружение объектов с помощью усиленного каскада простых признаков // Доклады конференции IEEE Computer Society по компьютерному зрению и обработке изображений, 2001. — Т. I-511.



УДК 004.424

Оптимизация вычисления формулы Блэка — Шоулза под архитектуру RISC-V

Аллутов И. Н., Панова Е. А., Волокитин В. Д., Мееров И. Б.¹, к. т. н.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
elena.panova@itmm.unn.ru

В работе проводится исследование производительности многоядерного процессора архитектуры RISC-V с поддержкой векторных вычислений и производится сравнение с серверным процессором Intel. В качестве бенчмарка рассматривается задача из области финансовой математики — вычисление формулы Блэка — Шоулза.

Ключевые слова: архитектура RISC-V; оптимизация программ; формула Блэка — Шоулза.

В последнее время все большее внимание привлекает область, связанная с тестированием производительности и разработкой программного обеспечения для активно развивающейся архитектуры RISC-V. В данной работе исследуются возможности архитектуры RISC-V с точки зрения производительности в сравнении с архитектурой x86 на примере известного бенчмарка из области финансовых вычислений — формулы Блэка — Шоулза [1–2].

Рассматривается задача определения справедливой цены колл-опциона европейского типа. При некоторых условиях она может быть вычислена по следующей формуле [1]:

$$C = S_0 F(d_1) - Ke^{-rT} F(d_2),$$
$$d_{1,2} = \frac{\ln \frac{S_0}{K} + \left(r \pm \frac{\sigma^2}{2} \right) T}{\sigma \sqrt{T}},$$

где C — цена опциона, S_0 , K , T — параметры, r , σ — характеристики финансового рынка, F — интегральная функция стандартного нормального распределения. На практике цены опционов вычисляются одновременно для большого числа параметров. Сокращение времени вычисления набора опционов является важной задачей, поскольку скорость принятия решения существенно зависит от времени финансовых расчетов. В работе в качестве бенчмарка рассматривается вычисление массива цен опционов при фиксированных параметрах r , σ и варьируемых параметрах S_0 , K , T .

Тестовые запуски производились на устройстве Lichee Pi 4A (CPU TH1520 RISC-V 64GCV C910, 4 ядра, 2 ГГц, RVV 0.7.1, LPDDR4X-3733, 16 Гб). Сравнение с архитектурой x86 производилось на основе запусков на узле суперкомпьютера с двумя серверными процессорами Intel Xeon Silver 4310T (2×10 ядер, 2,30 ГГц, AVX512, DDR4-2667, 64 Гб). Использовались компиляторы GCC 8.4.0 для RISC-V и Intel oneAPI DPC++/C++ Compiler 2023 для x86. Основное внимание уделялось возможности вычислений в векторном и многоядерном режимах. Код бенчмарка публично доступен [3].



Показано [2], что для достижения приемлемой производительности данного бенчмарка на архитектуре x86 достаточно воспользоваться средствами OpenMP. Для рассматриваемой тестовой конфигурации ускорение от векторизации на наборе из 100 миллионов опционов составило 6,3 раз, ускорение параллельной версии относительно векторной однопоточной — 14,5 раз. Для организации параллелизма мы учитывали особенности двухпроцессорной системы с неоднородным доступом к памяти (NUMA). Дальнейшие оптимизации не приводят к ускорению, т. к. производительность ограничена возможностями кеша L3.

Для организации векторных вычислений на RISC-V мы использовали соответствующие функции-интринсики, компилирующиеся в инструкции RVV 0.7.1. Большой проблемой стало отсутствие библиотеки для векторного вычисления математических функций (аналога SVMML в компиляторе Intel). В процессе работы были реализованы собственные пробные версии необходимых векторных математических функций с точностью до шести знаков после запятой для типа данных `binary32` (тип `float` в языке C), что достаточно для данной задачи. Для сравнения также была разработана аналогичная версия кода для архитектуры x86 с использованием интринсиков AVX512. На архитектуре RISC-V удалось достигнуть ускорения 4,2 раз в векторном режиме и 4,0 раз в параллельном режиме относительно векторной однопоточной версии, что близко к теоретическому максимуму на данном процессоре. После всех оптимизаций отставание версии для RISC-V от версии x86 составило 6,3 раз при задействовании четырех физических ядер процессоров TH1520 и Intel Xeon Silver 4310T и 24,5 раз на максимальном числе ядер обоих процессоров.

В докладе будет представлен пошаговый анализ результатов экспериментов, демонстрирующий влияние разных приемов оптимизации кода на результаты производительности на процессорах архитектуры x86 и RISC-V.

Работа поддержана Минобрнауки РФ, проект № FSWR-2023-0034.

Литература

1. Black F., Scholes M. The pricing of options and corporate liabilities // Journal of political economy, 1973. Vol. 81. № 3. P. 637–654.
2. Panova E. et al. Black-Scholes Option Pricing on Intel CPUs and GPUs: Implementation on SYCL and Optimization Techniques // Russian Supercomputing Days. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 48–62.
3. Открытый исходный код бенчмарка. — URL: https://github.com/PanovaElena/BS_benchmark_riscv.

УДК 004.416.6

Оптимизация `xxHash` для RISC-V с использованием различных реализаций RVV

Пономарев Н. А.

Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
n.ponomarev@spbu.ru

Библиотека `xxHash`, реализующая быстрые функции хеширования, активно используется в Netflix и MySQL, в QEMU и btrfs. Будет представлен результат оптимизации алгоритмов библиотеки под различные реализации RVV и полученный опыт работы с различными технологиями в период активного развития платформы.

Ключевые слова: хеширование; оптимизация; RISC-V; векторизация.

RISC-V — молодая и активно развивающаяся архитектура. Для экосистемы любой архитектуры очень важно наличие широко используемых библиотек и оптимизации для них. `xxHash` [1] — современной библиотеки для хеширования, скорость которой обеспечивается использованием векторных инструкций процессора. Так, например, в библиотеке уже имеется поддержка наборов инструкций SSE2, AVX512 и NEON.

Однако поддержка векторного расширения для платформы RISC-V — RVV — в библиотеке отсутствует, что и стало целью исследования.

Разработка процессора от дизайна до кремния занимает продолжительное время, и доступные потребителю процессоры, к сожалению, отстают от актуальных спецификаций архитектуры, поэтому существуют две несовместимые между собой версии RVV, доступные исследователям [2]:

- RVV 1.0 — официально принятая версия. Тем не менее на данный момент нет ни одной аппаратной платформы, доступной для покупки, где она была бы реализована;
- RVV 0.7.1 — бета-версия расширения, которую можно найти в процессорах от T-Head.

В нашем распоряжении был SBC Sipeed Lichee Pi 4A с поддержкой RVV 0.7.1, на котором и проводились эксперименты.

Основная идея работы была простой: адаптировать идеи существующего кода для других наборов инструкций, добавив поддержку RVV обеих версий с использованием `intrinsic`-функций. Однако было встречено несколько трудностей:

- RVV 0.7.1 поддерживает только форк компилятора GCC от компании T-Head, а современные версии GCC и Clang поддерживают только RVV 1.0;
- новые версии компиляторов (GCC 13 и выше, Clang 16 и выше) используют префикс `__riscv` для `intrinsic`-функций, что при написании кода для обеих версий стандарта требует использования возможностей препроцессора;
- в RVV 0.7.1 отсутствуют некоторые инструкции, присутствующие в RVV 1.0, что увеличивает объем и сложность кода.

После реализации оптимизированных функций появилась необходимость измерить производительность написанного кода.



Для выбора набора команд — скалярного или векторного — используется препроцессор. А для тестирования производительности библиотека имеет встроенный бенчмарк. Поэтому эксперименты для сравнения оптимизаций проводить несложно.

Для тестирования работоспособности кода использовался эмулятор QEMU, поэтому первая попытка измерения производительности была произведена с его помощью, однако она не увенчалась успехом в силу того, что QEMU производит все векторные операции, используя скалярные регистры.

После этого было проведено тестирование на плате. Его результаты оказались гораздо более реалистичными, тем не менее векторизованная версия показала худшее время работы [3]. Предполагается, что причина замедления кроется в достаточно специфической операции перемещения элементов внутри векторного регистра.

Литература

1. Cyan4973/xxHash. URL: <https://github.com/Cyan4973/xxHash> (дата обращения: 09.07.2024).
2. Implications of widely distributed draft 0.7.1 implementation(s) · Issue #667 · riscv/riscv-v-spec. URL: <https://github.com/riscv/riscv-v-spec/issues/667> (дата обращения: 09.07.2024).
3. Add RISC-V RVV implementation by WoWaster · Pull Request #898 · Cyan4973/xxHash. URL: <https://github.com/Cyan4973/xxHash/pull/898> (дата обращения: 09.07.2024).



УДК 004.051

Инструмент для оценки ВРУ

Ефремов А. А., Слинчук Д. А.

Математико-механический факультет СПбГУ

198504, г. Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский просп., 28

Разработан инструмент для оценки эффективности модуля предсказания переходов (branch prediction unit) различных процессоров. Описаны основные компоненты инструмента и их особенности. Представлены оценки различных процессоров и моделей ВРУ с помощью данного инструмента.

Ключевые слова: ВРУ; анализ CPU; счетчики производительности; сравнение ВРУ; Gem5; RISC-V.

На сегодняшний день метод конвейеризации инструкций повсеместно используется для ускорения процессора, однако его эффективность страдает от инструкций перехода, вызывающих сброс конвейера. Чтобы предотвратить сброс конвейера, в процессорах используется модуль предсказания переходов (ВРУ). ВРУ уменьшает количество сбросов конвейера, предсказывая следующую выполняемую часть кода.

Различные реализации ВРУ обладают различной степенью эффективности [1, 2]. Изучение сценариев, при которых ВРУ показывает низкую эффективность, может улучшить его архитектуру.

Одним из способов выявления таких сценариев является метод фаззинга. В рамках данной работы был разработан инструмент, основанный на этом методе. Инструмент состоит из трех отдельных компонентов: *generate* (генерация случайных тестов на C), *analyze* (сбор данных о работе ВРУ) и *summarize* (анализ и визуализация результатов).

Компонента *generate* формирует тесты-программы на C, созданные на основе случайного абстрактного синтаксического дерева.

Компонента *analyze* отвечает за запуск тестов и получение данных о ВРУ, при этом используя различные способы повышения точности и повторяемости результатов. Инструмент поддерживает работу с симулятором процессоров Gem5, позволяя моделировать и тестировать ВРУ без создания физического процессора, а также удаленный запуск тестов на другой машине.

Компонента *summarize* визуализирует результаты на графике, отражающем долю неверно предсказанных переходов, что помогает быстро идентифицировать аномалии, чтобы позже более детально изучить все данные по этому тесту.

В ходе работы, с применением разработанного инструментария был проведен обширный анализ устройств, относящихся к трем различным архитектурным платформам — x86, ARM и RISC-V. А также в рамках этого анализа были получены результаты оценки для десяти моделей ВРУ, представленных в симуляторе Gem5.

Литература

1. Youssif A., Ismail N., Torkey F. Comparison of branch prediction schemes for superscalar processors iceec 2004 // Electrical, Electronic and Computer Engineering, 2004. ICEEC'04. 2004 International Conference on, 2004. P. 257–260.
2. Quadri S.A.I., Jahangir M.Z. Design, Implementation and Performance Comparison of Different Branch Predictors on Pipelined-CPU // 2017 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE). IEEE, 2017. P. 1–7.



УДК 621.3.049.77

Образовательное Linux-capable процессорное ядро RISC-V

Примаков Е. В., Силантьев А. М., Кулешов В. К., Протасова Е. А.,
Гуржов Н. А., Артамонов А. С., Тарасова А. Н.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработано HDL-описание процессорного ядра на базе архитектуры RISC-V, включающее в себя все необходимые расширения и функциональные блоки для запуска ОС GNU/Linux. Приведены характеристики и микроархитектурные решения разработанного ядра. Показаны способы использования процессорного ядра в образовательном процессе.

Ключевые слова: RISC-V; Linux; процессор; микроархитектура; учебный процесс.

На сегодняшний день изучение устройства продвинутых процессорных ядер, умеющих исполнять программный код не только в machine-mode, с точки зрения архитектуры и микроархитектуры происходит только в рамках лекционных занятий или изучения готовых open-source-решений [1]. Такой формат подачи исключает возможность освоить информацию до ее применения в рабочих задачах. С точки зрения образовательного процесса данный лекционный материал требует создания курса лабораторных занятий, где обучающиеся могли бы интерпретировать свои знания при создании с нуля или модификации компонентов процессорного ядра. Данное предложение невозможно реализовать без наличия полностью контролируемой кодовой базы процессорного ядра, которое в первую очередь проектировалось для образовательных целей, но при этом обладало бы полным функционалом для запуска ОС GNU/Linux.

Целями данной работы являлись:

- непосредственно разработка процессорного IP-ядра и макета системы на кристалле, удовлетворяющих всем функциональным требованиям для запуска современной многозадачной многопользовательской ОС (на примере GNU/Linux);
- разработка комплекта образовательных материалов и учебных курсов, посвященных продвинутому аспектам проектирования процессорных ядер и систем на их основе. Предполагается использование данных материалов для подготовки студентов в рамках совместной программы магистратуры от МИЭТ и YADRO;
- наработка профильного опыта у сотрудников НИЛ ЭСК МИЭТ и подготовка стажеров для профильных компаний.

В рамках работы был сформирован следующий перечень требований к процессорному ядру и системе на его основе:

- ISA — RV64GC;
- режимы привилегий — Machine, Supervisor, User;
- конвейерная in-order-микроархитектура без суперскалярности, 5-6 стадий [2];
- одноуровневые частично-ассоциативные кэши инструкций и данных (write-through);

- поддержка страничной виртуальной памяти (sv39);
- одноуровневые ITLB и DTLB, программная подгрузка таблиц TLB (SPW);
- реализация механизма PMP согласно спецификации RISC-V, 16 регионов защиты памяти;
- интерфейс для системной отладки с поддержкой gdb и OpenOCD;
- простой механизм предсказания ветвлений (BTV + BHT);
- поддержка OpenSBI;
- контроллер прерываний согласно спецификации RISC-V Platform-Level Interrupt Controller Specification.

В рамках первого этапа работы было разработано RTL-описание модулей процессорного ядра и подготовлена документация с описанием внутреннего устройства, параметров, интерфейсов, регистров конфигурации, разработано верификационное окружение и проведена функциональная верификация, подготовлены тестовые программы на C для инициации и демонстрации работоспособности симуляции, разработаны скрипты для запуска симуляции для демонстрации работоспособности.

Литература

1. Heinz C. et al. A catalog and in-hardware evaluation of open-source drop-in compatible RISC-V softcore processors // 2019 International Conference on ReConfigurable Computing and FPGAs (ReConFig). IEEE, 2019. P. 1–8.
2. Абрамов Е. М. Анализ методов разрешения конфликтов конвейера по управлению на примере открытой архитектуры RISC-V // Микроэлектроника и информатика — 2018, 2018. — С. 3–10.



УДК 004.231.3

Использование открытых инструментов для Step-and-Compare-верификации RISC-V-ядер

Чусов С. А.

Научно-исследовательская лаборатория энергоэффективных систем на кристалле

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

chusserge@mail.ru

Подробно рассмотрен подход к верификации RISC-V-ядер Step-and-Compare, основанный на сравнении состояния тестируемого ядра с состоянием эталонной модели через определенные промежутки времени в ходе функциональной симуляции. Проанализирована область открытого программного обеспечения, определены инструменты, позволяющие реализовать Step-and-Compare-подход. По шагам разобрано проектирование простейшего верификационного окружения с использованием данных инструментов.

Ключевые слова: функциональная верификация; RISC-V; процессор; эталонная модель; сравнение; синхронное сравнение; открытое программное обеспечение.

В настоящее время популярность набирает архитектура набора команд (АНК) RISC-V [1]. В 2015 году был создан международный фонд архитектуры. Уже с 2018 года он работает в партнерстве с The Linux Foundation. Основная отличительная черта архитектуры RISC-V — ее открытость. Так как АНК может быть использована бесплатно, то уже сейчас вокруг RISC-V сформировалось сообщество из множества разработчиков, готовых к сотрудничеству и обмену опытом. Еще одной особенностью RISC-V является модульность. Базовый набор содержит 49 инструкций, при этом в спецификациях присутствует несколько десятков расширений для аппаратной поддержки дополнительного функционала. Также инженерам предоставлена возможность создания нестандартных команд и их интеграции в архитектуру.

Основным цифровым блоком систем на кристалле в большинстве случаев является процессор, выполняющий программную обработку цифровых данных. Сфера верификации процессорных ядер является одной из самых актуальных составляющих индустрии проектирования и верификации сложнофункциональных блоков. В ходе работы был подробно рассмотрен подход к верификации RISC-V-ядер Step-and-Compare, основанный на сравнении состояния тестируемого ядра с состоянием эталонной модели через определенные промежутки времени в ходе функциональной симуляции. В большинстве реализаций данного подхода состояния сравниваются в момент выполнения ядром инструкции.

В ходе работы было проанализировано открытое программное обеспечение, предоставляющее возможности для реализации подхода к верификации RISC-V-ядер Step-and-Compare. В качестве эталонной модели был выбран симулятор набора команд Spike [2] вместе с программной оболочкой Hammer [3], предоставляющей интерфейсы C++ и Python для получения информации о состоянии модели. В качестве симулятора был выбран активно развивающийся Verilator [4], поддерживающий множество конструкций языка описания и верификации цифровых устройств

SystemVerilog. Данный язык был выбран в качестве основного для проектирования основы верификационного окружения.

Заключительной частью являлся разбор проектирования простейшего верификационного окружения с использованием выбранных инструментов.

Литература

1. RISC-V: Open standard Instruction Set Architecture (ISA). URL: <https://riscv.org/about> (дата обращения: 10.07.24).
2. Симулятор АНК RISC-V Spike. — URL: <https://github.com/riscv-software-src/riscv-isa-sim> (дата обращения: 10.07.24).
3. Программная оболочка Hammer. — URL: <https://github.com/rivosinc/hammer> (дата обращения: 10.07.24).
4. Verilog/SystemVerilog симулятор Verilator. URL: <https://github.com/verilator/verilator> (дата обращения: 10.07.24).



УДК 621.3.049

Виртуализация NTB-соединений в QEMU

Карасев М. А., Тиняков С. А., Гаврилов А. В., Заславский М. М., к. т. н.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф

В докладе рассказывается о проблеме применения технологии NTB поверх шины PCIe. Рассматривается задача виртуализации технологии NTB в QEMU, решение которой было сведено к созданию частичной виртуализации IDT 89NPES24NT6AG2 PCI Express Switch, модификации модуля ядра Linux для поддержки решения и сборки с помощью Yocto Project. Для разработанного решения проведена серия экспериментов, показавшая ограничения производительности текущей реализации, вызванные особенностями работы QEMU.

Ключевые слова: NTB; RDMA; PCI; QEMU; СХД.

В условиях постоянного роста данных и количества вычислительных устройств возрастают и требования к скорости обработки информации. Один из ключевых элементов современных вычислительных систем — системы хранения данных (СХД) — должны уметь быстро обрабатывать поступающие запросы и обеспечивать высокую доступность данных. Такие системы работают в непрерывном режиме, для которого любой простой или задержка с выдачей данных являются критичными, поэтому, как правило, СХД характеризуются двумя показателями — скоростью доступа к данным и отказоустойчивостью. Для обеспечения требуемых значений данных характеристик применяется архитектура Symmetric Active-Active. Она заключается в использовании двух равноправных контроллеров для доступа к одним и тем же данным. Активность контроллеров позволяет убрать единую точку отказа и одновременно обрабатывать запросы. Для обеспечения такого сценария работы необходим инструмент для достижения когерентности (синхронности) состояний контроллеров. Перспективной технологией для этой цели является NTB (Non-Transparent Bridge) — технология, скрывающая два и более PCI-домена друг от друга за конечным устройством, что позволяет им взаимодействовать без конфликтов. В рамках NTB для каждого домена все остальные выглядят как конечное устройство, через которое можно осуществлять взаимодействие. Это позволяет соединить вычислительные узлы из разных PCI-доменов в одну систему. В первую очередь эта технология позволяет писать данные в DMA-память (Direct Memory Access) другого хоста (контроллера) и читать из нее без затрат процессорного времени.

Задачей данной работы является реализация NTB-соединения между двумя гостевыми виртуальными машинами. Целевой сценарий — это использование RDMA-технологий с помощью NTRDMA [1].

Решение было выполнено в виде двух виртуальных машин с настроенным NTB-соединением. Для того чтобы обеспечить воспроизводимость сборок, а также для того чтобы и QEMU, и тестовые гостевые системы собирались и разрабатывались в одном месте, используется система сборки Yocto Project. Унификация сборок была достигнута за счет Docker-контейнера, который с помощью интерфейса командной строки реализует четыре сценария исследования:

- 1) собирает проект (только ядро, только QEMU или все сразу);

- 2) запускает тестовые гостевые системы через собранный QEMU (одну или пару связанных, то есть вместе с `ivshmem-server`);
- 3) синхронизирует патчи из репозитория проекта в репозиторий с року.

В качестве основы эмулируемого устройства в QEMU была использована спецификация устройства IDT 89NPES24NT6AG2 [2]. Для реализации нового устройства за основу была взята реализация устройства `ivshmem`, которое позволяет пробрасывать в виртуальную машину разделяемую память. Дополнительно данное устройство позволяет посылать прерывания другим виртуальным машинам. Для этого придуман свой API и реализован сервер (`ivshmem-server`) в QEMU. Данное устройство выглядит идеальным для начала разработки, так как реализует одну из больших сложностей — общение двух виртуальных машин. Фактически `ivshmem`-устройство было доработано для обработки операций чтения-записи по адресам из спецификации IDT. Был реализован минимум для поддержки одного окна памяти при коммуникации по NTB. Также был доработан и драйвер IDT-устройства, который реализует операции, не описанные в спецификации, но это необходимо для корректной инициализации с технологиями NTRDMA.

В результате были успешно реализованы виртуальное устройство и тестовый стенд, где можно тестировать технологию NTB. Хотя в реализации и использовалась разделяемая память, но пропускная способность оказалась крайне низкой, так как используются обращения к `memory window` в QEMU, которая обрабатывает данные по 4 байта, что приводит к огромным накладным расходам и к пропускной способности в 713,2 киббайта в секунду.

Литература

1. Hubbe A. NTRDMA v0.1 — An Open Source RDMA Driver for PCIe NTB and DMA. Linux Piter 2015.
2. IDT 89NPES16T4AG2 PCI Express Switch User Manual / Integrated Device Technology, Inc. Silver Creek Valley Road, San Jose, California, 2013.



УДК 004.454

Применение DMA Engine API для разработки драйверов и эмуляция DMA-контроллеров в QEMU

Ерхов М. С.

ПАО «Сбербанк»

121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32, к. А

erkhov.ms@phystech.edu

Разработана модель, эмулирующая функциональность DMA-контроллера в QEMU, и соответствующие драйверы с применением DMA Engine API. Приведены преимущества интеграции (использования) данного API при разработке драйверов для DMA-контроллеров, а также представлен анализ написания таких драйверов. В работе описана архитектура модели и ее взаимодействие с драйвером.

Ключевые слова: DMA Engine API; драйверы; ядро Linux; QEMU; эмуляция устройств.

В ядре Linux DMA Engine API [1, 2] предоставляет высокоуровневый интерфейс для работы с операциями прямого доступа к памяти (DMA) [2, 3], который позволяет абстрагироваться от аппаратного обеспечения. В данном API используется драйверная модель client/master: master управляет конкретным DMA-контроллером, реализуя функции для выполнения операций передачи данных, а client использует функционал master [1, 2]. Это обеспечивает стандартизацию работы с DMA, а также ускоряет разработку, так как client при таком подходе не привязан к конкретному контроллеру и может быть использован для нескольких master-драйверов. Ввиду недоступности аппаратного контроллера DMA принято решение реализовать его модель в виртуальной среде QEMU[4], которая позволяет точно воспроизводить поведение устройств.

Целью данной работы является разработка модели проектируемого в проекте контроллера DMA в QEMU, а также драйверов client и master с использованием DMA Engine API для управления моделируемым устройством. Для подтверждения корректной работы драйверов и модели нужно провести их тестирование. Рассмотрим каждую из составляющих данной работы: модель устройства, драйвер master, драйвер client, тестирующую систему.

1) Драйвер master

При загрузке системы DMA master-драйвер инициализирует контроллер DMA, настраивает и регистрирует каналы DMA и предоставляет необходимый для client-драйвера интерфейс. Далее драйвер ждет инструкций от клиента. При инициализации отправки данных со стороны client, master конфигурирует контроллер DMA для выполнения этой передачи. Далее модель устройства выполняет транзакцию, генерирует прерывание и уведомляет master о завершении работы. Затем master уведомляет клиента.

2) Драйвер client

Драйвер регистрируется, создает символьное устройство для тестирующей системы и захватывает каналы DMA, созданные master. При получении данных через символьное устройство для отправки по DMA client формирует scatter/gather-таблицу, регистрирует callback-функцию для уведомления и формирует запрос

на передачу данных master-драйверу. Затем ждет окончания выполнения DMA-транзакции, ожидая, пока master вызовет callback-функцию клиента.

3) Модель устройства в QEMU.

Модель представляет собой эмуляцию PCIe устройства с двумя BAR: один из них используется под регистры устройства, другой — в качестве памяти. Программирование модели контроллера заключается в изменении состояний регистров, которые управляют его работой. В контексте модели необходимо поддерживать отклик на изменение состояний регистров, как это делало бы реальное устройство. В модели это делается за счет вызова функций, предоставляемых библиотеками QEMU. При работе master-драйвера дескрипторы DMA загружаются в память модели, программируются регистры для начала работы. Моделью затем вызывается соответствующая функция, которая по адресам из дескрипторов копирует данные в память или из памяти устройства. В конце обработки генерируется прерывание MSI и уведомляется master.

Основное отличие модели от реального устройства состоит в том, что в модели устройства дескрипторы хранятся в специально отведенной области памяти устройства, а не в памяти HOST машины, но это не является существенным ограничением для разработки.

4) Тестирующая система

Тестирование каналов DMA проводилось через символическое устройство, которое предоставляет драйвер client. Сначала тестом инициируется команда записи данных в устройство, после тест формирует команду чтения данных из устройства. После завершения передачи данных в обоих направлениях проверяется корректность работы драйвера путем сравнения отправленных данных с полученными. Во время тестирования также измерялась скорость передачи данных. Однако поскольку в модели устройства выполняется передача данных память — память, то полученная скорость будет отличаться от скорости передачи реального устройства.

В результате работы реализована модель проектируемого DMA-контроллера и разработаны драйверы master и client с использованием DMA Engine API. Выполнена проверка взаимодействия драйверов и модели. Корректность работы устройства и драйверов проверена с помощью тестирующей системы.

Литература

1. Официальный сайт по ядру Linux. — URL: <https://docs.kernel.org/driver-api/dmaengine/client.html>.
2. John Madieu. Linux Device Driver Development. Packt, 2022.
3. Роберт Лав. Ядро Linux. Описание процесса разработки, 2014.
4. Официальный сайт по QEMU. — URL: <https://www.qemu.org/docs/master/system/device-emulation.html>.



УДК 004.416.6

Применение алгоритмов контекстно-свободной достижимости для задач статического анализа кода

Кутуев В. А.

Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
vladimir.kutuev@gmail.com

Разработана модификация тензорного алгоритма контекстно-свободной достижимости, к которой могут быть сведены некоторые виды статического анализа кода. Эффективность данной версии алгоритма была проверена экспериментально на данных, полученных на реальных программах.

Ключевые слова: анализ графов; контекстно-свободная достижимость; статический анализ кода; разреженные матрицы; произведение Кронекера.

Статический анализ играет важную роль в задаче поиска ошибок в коде. Многие виды статического анализа могут быть сформулированы как задача контекстно-свободной (КС) достижимости в графе. Она заключается в определении существования пути между парой вершин, задающего слово, которое принадлежит языку, описываемому КС-грамматикой. Один из примеров задачи, сводимой к КС-достижимости, — анализ псевдонимов или анализ указателей. Он позволяет обнаруживать использование освобожденной памяти, взаимные блокировки и обращение к выделенной памяти через тип с несоответствующим размером [1]. Еще один пример — анализ указателей, учитывающий поля, особенностью которого являются большие грамматики, описывающие соответствующие ограничения на пути.

Существует множество алгоритмов, решающих задачу КС-достижимости. Среди них можно выделить алгоритмы, основанные на операциях линейной алгебры: матричный [2] — основанный на умножении матриц, и тензорный [3] — основанный на произведении Кронекера, так как такие операции хорошо поддаются распараллеливанию.

При сведении задачи анализа указателей, чувствительного к полю, к задаче КС-достижимости возникают грамматики с большим числом продукций, что делает матричный алгоритм плохо применимым, так как он очень чувствителен к размеру грамматики. В тензорном алгоритме эта проблема решается заданием КС-языка не грамматикой, а рекурсивным автоматом, который можно представить в виде разреженных матриц. Однако для пересечения рекурсивного автомата и ориентированного графа необходимо считать произведение Кронекера соответствующих матриц смежности для всех меток на ребрах в графе и рекурсивном автомате.

В целях уменьшения числа операций был рассмотрен другой способ представления графа и рекурсивного автомата. Их можно представлять не набором булевых матриц для каждой метки, а одной матрицей, содержащей целые числа, кодирующие все метки на ребре. Также для корректного вычисления произведения Кронекера с таким кодированием была реализована специальная операция умножения элементов матриц.

Данная модификация [4] тензорного алгоритма показала значительно лучшее время работы в решении задачи анализа указателей, чувствительного к полям, чем обычная версия на графах и грамматиках, полученных по реальным программам.



Также на небольших графах показано наилучшее время работы среди алгоритмов, основанных на операциях линейной алгебры.

Литература

1. Palix N., Gaël T., Suman S. et al. Faults in Linux: Ten Years Later // Proceedings of the Sixteenth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. ASPLOS XVI. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2011. P. 305–318.
2. Azimov R., Grigorev S. Context-Free Path Querying by Matrix Multiplication // Proceedings of the 1st ACM SIGMOD Joint International Workshop on Graph Data Management Experiences & Systems (GRADES) and Network Data Analytics (NDA). GRADES-NDA '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018. 10 p.
3. Orachev E. et al. Context-free path querying by kronecker product // Advances in Databases and Information Systems. Springer International Publishing, 2020. P. 49–59.
4. Tensor algorithm modification for field-sensetive points-to analyzis. URL: https://github.com/FormalLanguageConstrainedPathQuerying/CFPQ_PyAlgo/tree/vkutu-ev/ot_tensor (дата обращения: 2024.07.09).



УДК 004.451.51

Процесс восстановления данных в RAID-1 на основе SPDK

Сичкар Г. К., Кононова Ю. А., Васенина А. И.

Санкт-Петербургский государственный университет

199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

georgy.sichkar@yandex.ru

Реализован процесс восстановления данных для имплементации RAID-1 внутри фреймворка SPDK, реализующего логику блочных устройств в пространстве пользователя. Реализация выполняет учет поврежденных областей RAID-1 и восстанавливает их, не прибегая к полному копированию.

Ключевые слова: хранение данных; RAID; дисковые сбои; восстановление данных; SPDK.

Одними из важнейших характеристик СХД являются надежность и отказоустойчивость. Иными словами, способность системы хранения в случае частичной поломки иметь возможность восстановить потерянные данные и продолжить функционировать в штатном режиме.

Примером технологии с подобной функциональностью является RAID-1 [1] — объединение нескольких блочных устройств, каждое из которых хранит копию одних и тех же данных. За счет избыточности RAID-1 позволяет восстановить информацию при замене поврежденного базового устройства.

На данный момент большинство RAID-массивов реализуются внутри пространства ядра, в том числе RAID-1. Однако возможен альтернативный подход, при котором вся основная логика СХД перемещается в пространство пользователя. Такой подход используется в SPDK [2] — фреймворке с открытым исходным кодом для работы с блочными устройствами, разработанном Intel Corporation. К особенностям SPDK можно отнести опрос оборудования на предмет завершения запросов ввода-вывода вместо использования прерываний, а также перемещение всех необходимых драйверов блочных устройств в пространство пользователя. Более того, опираясь на отчеты о производительности компании Intel, можно зафиксировать увеличение скорости работы СХД [3].

Фреймворк содержит внутри себя реализацию массива RAID-1. Однако эта реализация неполная и содержит ряд критических недочетов, влияющих на уровень предоставляемой отказоустойчивости:

- отсутствие функциональности частичного восстановления поврежденных данных, например, в ситуации, когда блочное устройство подключено по сети и временно теряет соединение;
- запуск нового процесса восстановления данных в отдельном потоке. Это может влиять на производительность всей системы, так как за время нахождения RAID-1 в активном режиме процесс восстановления может повторяться многократно, а значит, и новый поток под эти цели будет выделяться многократно.

Предложенная альтернативная реализация [4] процесса восстановления решает часть вышеперечисленных проблем.

- Реализована функциональность, отвечающая за контроль актуальности хранимых данных, позволяющая точно восстанавливать поврежденные

области. Для контроля используется матрица ребилда — структура данных, представляющая собой массив из атомарных переменных. Каждая переменная отвечает за актуальность набора областей в RAID-массиве. Для изменения статуса области используется операция CAS (compare and set), что позволяет корректно обновлять матрицу при многопоточной обработке запросов.

- Для запуска нового процесса восстановления данных применяется механизм поллинга, предоставляемый фреймворком SPDK. Этот механизм работает в одном отдельном потоке на протяжении всей работы RAID-1 и в случае появления поврежденных данных запускает процесс восстановления.
- При каждом запуске создается снимок текущего состояния RAID-массива. Восстановление данных происходит согласно снимку, в момент времени восстанавливается только фиксированный набор областей, что позволяет снизить нагрузку на систему. По окончании восстановления набора областей состояние матрицы ребилда обновляется путем выполнения операции CAS с соответствующей атомарной переменной.

Литература

1. Patterson D. A., Gibson G., Katz R. H. A case for redundant arrays of inexpensive disks (RAID) // Proceedings of the 1988 ACM SIGMOD international conference on Management of data, 1988. P. 109–116.
2. Accelerating your NVMe drives with SPDK. URL: <https://spdk.io/doc/about.html> (дата обращения: 2024.07.05).
3. Latecki K., Chachulski J. SPDK NVMe BDEV Performance Report Release 23.09. 2023. URL: https://ci.spdk.io/download/performance-reports/SPDK_nvme_bdev_perf_report_2309.pdf (дата обращения: 2024.07.05).
4. Rebuild process. URL: <https://github.com/sumr-proj/spdk/pull/11> (дата обращения: 2024.07.05).



УДК 004.4'242

Генерация модульных тестов, основанных на конфигурации Spring-приложения

Шишин К. А., Муравьев И. В., Куликов Е. К.

Санкт-Петербургский государственный университет

199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

kirill.a.shishin@gmail.com, muravjovilya@gmail.com, egor.k.kulikov@gmail.com

Разработан механизм анализа контекста Spring-приложения, позволяющий генерировать тестовые сценарии, соответствующие реальному исполнению программы. Предложенный механизм встроен в существующий инструмент автоматизации тестирования и апробирован на реальных проектах.

Ключевые слова: тестирование ПО; автоматическая генерация модульных тестов; фреймворк Spring; мокирование; UnitTestBot Java.

Последние десятилетия активно разрабатываются решения для автоматизации тестирования. Они призваны помочь существенно повысить покрытие программы тестами, многократно снизив время, потраченное на их написание. Довольно известным является эксперимент [1] под названием Coreutils, показывающий, насколько эффективной и полезной может быть автоматизация тестирования.

Среди автоматических генераторов тестов хотелось бы выделить проект с открытым исходным кодом UnitTestBot Java [2]. Это инструмент командной строки и плагин для IntelliJ IDEA, предназначенный для генерации модульных тестов для Java-приложений.

UnitTestBot Java способен создавать хорошие тесты для «чистой» Java (что подтверждается результатами соревнований генераторов тестов [3]), однако для этого языка написано множество фреймворков и библиотек, предъявляющих дополнительные требования к анализу пользовательского кода и виду генерируемых тестов. Один из самых популярных [4] фреймворков на сегодняшний день — Spring: он используется при разработке большинства промышленных проектов на Java. В связи с этим важно, чтобы UnitTestBot Java умел генерировать качественные тесты для приложений, использующих этот фреймворк.

Хотя на момент начала этого исследования UnitTestBot Java уже генерировал какие-то тесты для Spring-приложений, эти тесты сложно было назвать Spring-специфичными. В них, как и при тестировании обычных приложений на Java, мокируется поведение всех объектов, которые находятся вне тестируемого класса. Однако тестирование Spring-приложений подразумевает использование меньшего количества моков благодаря информации о реальном поведении программы, полученной в ходе анализа конфигурации приложения.

В рамках проведенной работы был разработан механизм анализа пользовательских конфигураций, а также в процессе внедрения механизма в инструмент UnitTestBot Java осуществлена модернизация символьного движка.

Суть модернизации состоит в изменении механизма выбора типов символических объектов: если раньше выбирался произвольный тип, который определялся SMT-решателем как удовлетворяющий ограничениям символьного пути, то теперь рассматриваются только те типы, которые используются в выбранной для генерации тестов конфигурации приложения.

Spring-специфичную информацию движок получает из анализатора конфигураций пользовательского приложения. Сбор этой информации осуществляется с использованием инструментов самого Spring во время инициализации контекста Spring-приложения.

В результате в инструменте UnitTestBot Java был поддержан механизм генерации модульных тестов, основанных на конфигурации Spring-приложения, позволяющий избегать излишнего мокирования и в ряде случаев генерировать тесты, которые более точно отражают реальное поведение программы и больше похожи на те, которые могли бы быть написаны вручную.

Литература

1. Cadar Cristian, Dunbar Daniel, Engler Dawson. KLEE: Unassisted and Automatic Generation of High-Coverage Tests for Complex Systems Programs // Proceedings of the 8th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation. OSDI'08. USA: USENIX Association, 2008. P. 209–224.
2. UnitTestBot/UTBotJava: Automated unit test generation and precise code analysis for Java. URL: <https://github.com/UnitTestBot/UTBotJava> (дата обращения: 2024.07.10).
3. Ivanov D. et al. UTBot at the SBFT 2023 Java Tool Competition //2023 IEEE/ACM International Workshop on Search-Based and Fuzz Testing (SBFT). IEEE, 2023. P. 68–69.
4. Java Programming — The State of Developer Ecosystem in 2023 Info-graphic. JetBrains: Developer Tools for Professionals and Teams, 2023. URL: <https://www.jetbrains.com/lp/devecosystem-2023/> (дата обращения: 2024.07.10).



УДК 004.457

Анализ системы сборки Yocto Project: устройство кеширования и оптимизация

Кондратенко К. Е., Тиняков С. А., Гаврилов А. В., Заславский М. М., к. т. н.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф

Сборка дистрибутивов Linux с помощью Yocto Project является популярным способом создания дистрибутивов встраиваемых операционных систем. Yocto позволяет всесторонне настроить как процесс сборки, так и результирующий образ, однако нередко сборка занимает много времени (минимальный образ на мощной персональной рабочей станции занимает порядка двух часов реального времени) и задействует большой объем вычислительных ресурсов машины, на которой выполняется сборка. В данном докладе был проанализирован вклад основных шагов сборки в общее время выполнения сборки и в общую нагрузку на ресурсы системы. Сделаны выводы о том, что на первом этапе сборки, когда происходит скачивание исходного кода утилит и пакетов, компиляция почти не происходит, что приводит к малому использованию ресурсов центрального процессора и ОЗУ, а также стало видно, что при увеличении количества зеркал кешей состояния растет и время сверки сигнатур кеша на этих зеркалах.

Ключевые слова: Yocto Project; sstate-cache; ускорение сборки.

Целью работы является анализ сборки Linux-дистрибутива с помощью Yocto Project на предмет выявления поля для оптимизации, выделение ключевых этапов, поэтапный анализ времени процессов и количества занимаемых ресурсов системы.

Так сборка дистрибутива Linux в Yocto Project состоит из нескольких этапов:

- пользовательская настройка;
- скачивание исходного кода;
- применение патчей;
- цикл обработки рецептов (конфигурация, компиляция, установка в рабочую директорию);
- создание образа.

Описанные выше этапы, а именно скачивание исходного кода, применение патчей, цикл обработки рецептов, создание образа, происходят последовательно в рамках одного пакета, однако обработка самих пакетов происходит параллельно, иными словами, один пакет может только скачиваться, в то время как другой уже встраивается в результирующий образ. Сборщик Yocto Project, Bitbake, запускает обработку пакетов так, чтобы в процессе сборки появлялось как можно меньше блокирующих задач и зависимостей, однако все равно такие блокирующие задачи появляются, а иногда происходят ситуации неоптимального использования ресурсов системы, такие ситуации будут рассмотрены ниже.

• В начале сборки, если локально не используются ранее загруженные данные или же архивы исходного кода не размещены в локальной сети с высокой пропускной способностью, происходит скачивание исходного кода утилит и пакетов, в это время задачи по компиляции либо совсем не выполняются, либо выполняются

в малом объеме, что приводит к тому, что ресурсы системы не используются в полной мере. Это приводит к увеличению времени всей сборки.

- Этапы применения патчей и цикл обработки рецептов нагружают систему почти полностью, что может говорить об оптимальном использовании ресурсов системы, однако на протяжении всей сборки (на протяжении двух часов) было подсчитано, что суммарно набралось порядка 5 минут, когда ресурсы ОЗУ и центрального процессора заняты не более чем на 70 процентов.

- Этап создания образа происходит по мере выполнения блокирующих задач; так, задачи этого этапа выполняются на протяжении всей сборки, однако в самом конце происходит построение системного каталога.

Рассмотрена возможность использования кеша состояний, благодаря использованию которого, в лучшем случае экспериментально, была достигнута скорость сборки 3,5 минуты вместо 120 минут в среднем и без использования `sstate-cache` (при этом из кеша восстанавливается 99% задач). Проведен эксперимент, дающий представление о вариациях использования зеркал кеша состояний, в ходе которого установлено, что:

- при росте количества работающих зеркал растет время их анализа;
- при росте количества неработающих зеркал время их анализа тоже растет;
- бывают случаи, когда зеркал меньше 10, что время анализа k зеркал больше времени анализа $k + 1$ зеркал.

Таким образом, на данном этапе можно сказать, что во время скачивания исходного кода неэффективно используются ресурсы системы, поведение сборщика при работе со `sstate-cache` требует детального анализа для выявления причин значительного роста времени сверки сигнатур кеша зеркал, а также последующих оптимизаций этого процесса.

Литература

1. Официальная документация проекта Yocto Project // Yocto Project Documentation. — URL: <https://docs.yoctoproject.org/index.html>.
2. Официальная документация BitBake // BitBake User Manual. — URL: <https://docs.yoctoproject.org/bitbake/2.8/index.html>.



УДК 004.4'416:004.4'422

Автоматизированная настройка оптимизирующих компиляторных преобразований с учетом особенностей целевых аппаратных платформ

Ефанов Н. Н., к. ф.-м. н., Акимов З. Д., Отращенко А. И., Лебедев Г. К., Подлесных Д. А., Белонин В. В.

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

Разработан комплекс программ автоматизированной настройки оптимизирующей компиляции посредством GCC, Clang или LCC, проведены эксперименты по оптимизации программ из открытых бенчмарков для архитектур x86, ARM и «Эльбрус». Дан обзор современного состояния предметной области. Показаны варианты улучшения эффективности решения задачи с использованием разработанных инструментов.

Ключевые слова: компиляторы; оптимизация ПО; оптимизирующие проходы; GCC; LLVM; LCC.

На сегодняшний день одним из основных способов оптимизации программного обеспечения является оптимизирующая компиляция [1–4]. Современные компиляторы реализуют сотни различных оптимизирующих проходов [1, 2], тонкое управление которыми позволяет существенно улучшать качество ПО по сравнению со стандартными уровнями оптимизаций (-O2, -O3, -Osize, и др.) практически в любом «необщем» случае [3]. В силу сложности ручного управления приобрели популярность исследования и разработки, посвященные построению методов и инструментов автоматизированного поиска последовательностей оптимизирующих проходов — автонастройке [1], как правило, фокусирующейся на переключении оптимизаций, реже — на изменении последовательности применения [2]. Это задача дискретной оптимизации по пространству большой размерности, и способы решения, реализованные в современных работах, различны: эвристический поиск с применением эволюционных алгоритмов, обучение с подкреплением, классическая оптимизация и др. В подавляющем большинстве решений, применимых в промышленной разработке, можно выделить следующие общие характеристики, ограничивающие эффективность оптимизации:

- компилятор рассматривается как «черный ящик», автонастройка производится путем взаимодействия с менеджером проходов или драйвером, не предоставляющим доступа ко всем настройкам и не раскрывающим внутреннего устройства проходов;
- рассматривается последовательность оптимизаций для одной единицы трансляции, реже — оптимизаций гранулярности функций;
- цикловые оптимизации рассматриваются отдельно;
- параметры проходов, такие как фактор раскрутки циклов, интерливинг-фактор и др., оптимизируются в отдельных решениях [1, 4], специально предназначенных под один тип оптимизаций, а не под всю последовательность;

- обычно производится однокритериальная оптимизация без ограничений, реже — оптимизация с ограничениями;
- методы характеристики программ, как правило, основаны на фиксированных счетчиках инструментирования [1, 2], реже — на комбинациях методов из NLP [4] и методов эмбединга графов [2];
- ключевыми факторами построения эффективной системы автонастройки являются гарантии, предоставляемые компиляторной инфраструктурой, и гибкость ее настройки, что и обуславливает популярность LLVM как основы для такой системы; к примеру, для компиляторов, не основанных на LLVM, задача перестановки последовательностей решается крайне редко и ограниченно [2].

Разработанные авторами инструменты позволяют решать задачу автонастройки, частично ликвидируя вышеупомянутые недостатки за счет:

- перестановки проходов компилятора GCC версий 7.3–7.5;
- гибридной потоко-чувствительной характеристики кода на GCC GIMPLE;
- окружения для экспериментов на разных уровнях гранулярности, в том числе при инструментировании исходного кода.

Экспериментально установлено, что применение данных инструментов позволяет уменьшать размер бинарных файлов без потери производительности до 10–12% (GCC) либо до 30% (Clang) для ARMv8, производительность — до 40% в отдельных случаях (GCC), а также дает существенные результаты по подбору линеек компилятора (LCC) для «Эльбруса».

Литература

1. Ashouri A. H. et al. A Survey on Compiler Autotuning using Machine Learning // ACM Computing Surveys (CSUR), 2018. Vol. 51. Issue 5. P. 1–42.
2. Отращенко А. И., Акимов З. Д., Ефанов Н. Н. Разработка средства оптимизации встраиваемого ПО на базе автонастройки перестановкой оптимизационных проходов современного компилятора GCC // Труды МФТИ, 2024. — Т. 16. — № 1 (61). — С. 44–59.
3. Lebedev G., Efanov N. Exploring the Space of Function Level Phase Ordering for Code Size Reduction at Constant Execution Time using Random Optimization Sequences in GCC // Конференция «Инжиниринг и телекоммуникации». 22–23 ноября 2023. P. 370–377.
4. Haj-Ali A. et al. Neurovectorizer: End-to-end vectorization with deep reinforcement learning // Proceedings of the 18th ACM/IEEE International Symposium on Code Generation and Optimization, 2020. P. 242–255.



УДК 004.451.1

Исследование способов ускорения работы DMA для периферийных устройств

Шиповский В. А.¹, Устюжанина М. А.^{1,2}¹ ПАО «Сбербанк»

117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1

Исследование посвящено изучению проблем и эффективности возможных оптимизаций работы DMA — технологии прямого доступа к памяти, минуя центральный процессор. В работе планируется рассмотреть механизм VFIO (virtual function input/output) для обеспечения прямого доступа к периферийным устройствам. Это позволяет проектировать драйверы устройств в пользовательском пространстве вместо пространства ядра ОС, что позволяет достичь снижения задержек на переключение контекста. Помимо этого, будет рассмотрено использование общей памяти для минимизации числа копирований при передаче больших массивов данных между процессами.

Ключевые слова: DMA; VFIO; общая память; передача данных.

На сегодняшний день одним из основных способов передачи данных между ПО хоста и периферийными PCI-устройствами является технология DMA (Direct Memory Access), механизм прямого доступа к памяти, минуя центральный процессор (ЦП). Она имеет ряд преимуществ по сравнению с прямым копированием (PIO), которое, наоборот, использует процессор как часть маршрута данных:

- увеличение производительности, получаемое за счет прямого доступа к памяти, минуя ЦП;
- более эффективное использование ресурсов процессора, так как DMA выполняет операции передачи в фоновом режиме, освобождая процессор для других задач;
- снижение задержки, что особенно проявляется при передаче больших объемов данных.

Главная проблема, ограничивающая скорость передачи данных, связана с задержками, вызванными необходимостью смены контекста исполнения процесса. Эта необходимость возникает из-за того, что буфер процесса находится в юзерспейсе, а значит, требуется вызов специальных функций драйвера устройства в ядре ОС.

В рамках исследования по оптимизации работы DMA в целях уменьшения времени ожидания при передаче и увеличения пропускной способности были изучены: механизм общей памяти между процессом и драйвером в юзерспейсе и технология vfiо, позволяющая создавать драйверы в юзерспейсе с аппаратной IOMMU-протекцией адресов.

В результате работы был спроектирован комплект ПО, состоящий из демона, реализующего работу DMA, избегая смены контекста, и тестового клиента для снятия замеров и демонстрации функциональности метода.



Литература

1. Лав Р. Ядро Linux. Описание процесса разработки, 3-е изд. — СПб.: Диалектика, 2022. — С. 364–369.
2. Матвеев М.Д. Ядро Linux. Сборка, настройка, управление. — СПб.: Наука и Техника, 2023. — С. 148–158.
3. Статья из документации Linux. — URL: <https://www.kernel.org/doc/html/latest/driver-api/vfio.html>.



УДК 004.72

Подходы к снижению коллизий маршрутизации в Mesh-сети в вычислительной системе на кристалле с распределенной памятью

Хайдуков Д. И.^{1,2}, Алексеев А. А.¹

¹ ПАО «Сбербанк»

121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32 кА
dikhaydukov@sberbank.ru

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
khajdukov.di@phystech.edu

Рассмотрены такие подходы к снижению коллизий маршрутизации в mesh-сети, как адресное чередование и гибкий алгоритм DOR. Результаты моделирования на потактовом симуляторе показывают существенный прирост пропускной способности сети как для каждого метода по отдельности, так и для их комбинации.

Ключевые слова: вычислительная система; сеть на кристалле; алгоритм маршрутизации DOR; адресное чередование.

Наиболее популярный в mesh-сетях алгоритм маршрутизации DOR (Dimension Order Routing), при котором пакеты передаются последовательно по измерениям сети [1], не обеспечивает равномерную пропускную способность всех узлов сети при высокой интенсивности трафика (рис. 1). В данных условиях актуально исследование подходов к снижению коллизий при маршрутизации. Новшеством в работе является адаптация классических методов оптимизации производительности сети на кристалле к вычислительной системе с распределенной памятью, а также исследование их совместимости.

В работе рассмотрены следующие подходы к снижению коллизий:

- метод адресного чередования [2], устраняющий коллизии запросов вертикальных узлов путем их жесткой привязки к соответствующим строкам распределенной памяти, однако требующий дополнительной аппаратуры для коммутации запросов при привязке к строке на основе адреса;
- гибкий алгоритм DOR [3], изменяющий последовательность измерений сети при передаче запросов вертикальных и угловых узлов и требующий поддержки механизма избегания взаимоблокировок в каждом маршрутизаторе;
- комбинация двух вышеперечисленных подходов.

Исследование в потактовом симуляторе для сценария с равномерной случайной нагрузкой в 100%, при котором исполнительные устройства по периметру отправляют запросы в центральные узлы с памятью в mesh 10×10, показало существенный прирост пропускной способности относительно алгоритма DOR для каждого из подходов (рис. 2). Выбор определенного метода зависит от допустимых аппаратных затрат, учитываемых на этапе разработки архитектуры системы.



Рис. 1. Интенсивность отправки при заданной равномерной интенсивности 100% в mesh 10x10 с алгоритмом DOR



Рис. 2. Изменение пропускной способности при заданной интенсивности 100%

Литература

1. Kaleem M., Isnin I. F. B. A survey on network on chip routing algorithms criteria // Springer Singapore, 2021. P. 455–466.
2. Grammatikakis M. D. et al. Address interleaving for low-cost NoCs // IEEE, 2016. P. 1–8.
3. Papaphilippou P., Van Chu T. Efficient deadlock avoidance for 2D mesh NoCs that use OQ or VOQ routers // IEEE Transactions on Computers, 2024.



УДК 004.428.2

Методы оптимизации кода для архитектуры «Эльбрус» на примере некоторых функций пакета Lapack

Карпочев Б. А.^{1,2}, Логинов В. Е.², к. т. н.

¹ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

² *АО «МЦСТ»*

117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

Данный доклад описывает методы оптимизации кода для архитектуры «Эльбрус». Дан краткий обзор библиотеки EML и архитектуры e2k. Рассмотрены аппаратные особенности, используемые для оптимизации кода под архитектуру e2k, приведены конкретные примеры оптимизации функций.

Ключевые слова: оптимизация кода; Эльбрус; EML; e2k.

Оптимизация функций вычислительной линейной алгебры под архитектуру любого процессора имеет большое значение, так как эти функции являются основой для большинства алгоритмов численного анализа и высокопроизводительных приложений. Пользователи могут столкнуться с потребностью в высокопроизводительных функциях вычислительной линейной алгебры в различных областях, таких как цифровая обработка сигналов, физика, машинное обучение. Оптимизация этих операций напрямую влияет на производительность многих приложений.

Многие производители современных процессоров предоставляют высокопроизводительные библиотеки, содержащие основные пакеты вычислительной линейной алгебры, такие как BLAS и Lapack. Примерами таких библиотек являются MKL и ACML. Эти библиотеки оптимизированы под архитектуру Intel и AMD соответственно и полностью нагружают всю доступную аппаратуру, тем самым увеличивая производительность функций. Для архитектуры «Эльбрус» также разработана подобная библиотека под названием EML (Elbrus Multimedia Library) [1].

Основная тема доклада — оптимизация функций вычислительной линейной алгебры, входящих в библиотеку EML, под архитектуру процессоров «Эльбрус». Были рассмотрены различные методы оптимизации, такие как учет количества арифметико-логических устройств, использование Array Prefetch Buffer (APB) [2], аппаратного счетчика и инструкций staa. Также рассматривается применение циклического буфера для оптимизации циклов с рекуррентностью.

В разделе «Примеры оптимизации под e2k» были рассмотрены конкретные примеры функций, таких как LARTV, AXPBY, LATM1 и GETC2. Были продемонстрированы методы оптимизации этих функций, а также оценена теоретическая и практическая производительность.

Таким образом, вышеперечисленные функции были успешно оптимизированы под архитектуру e2k, что позволило значительно повысить их производительность.



Литература

1. Ишин П.А., Логинов В.Е., Василец П. П. Ускорение вычислений с использованием высокопроизводительных математических и мультимедийных библиотек для архитектуры Эльбрус // Вестник воздушно-космической обороны. — М.: Научно-производственное объединение «Алмаз» им. акад. А.А. Расплетина, 2015. — № 4 (8). — С. 64–68.
2. Галазин А. Б., Грабежной А. В. Эффективное взаимодействие микропроцессора и подсистемы памяти с использованием асинхронной предварительной подкачки данных // Информационные технологии, 2007. — № 5. — С. 26–31.



УДК 004.45

Реализация в бинарном трансляторе x86->e2k уровня системы менеджера загрузки UEFI

Худякова Е. В.

АО «МЦСТ»

117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

mcst@mcst.ru

Для загрузки x86 ОС на платформе «Эльбрус» в режиме UEFI в бинарном трансляторе x86->e2k реализован алгоритм менеджера загрузки UEFI и поддержаны четыре протокола UEFI с использованием имеющихся в трансляторе модулей для взаимодействия с устройствами хранения данных. Произведена загрузка x86 ОС Linux на машине «Эльбрус-8C2».

Ключевые слова: «Эльбрус»; бинарный транслятор; UEFI; x86; e2k.

Частью бинарного транслятора x86->e2k для запуска x86 ОС на процессоре архитектуры «Эльбрус» является встроенное программное обеспечение BIOS. На данный момент BIOS является устаревшим и повсеместно заменяется прошивками на базе стандарта UEFI. В связи с этим было принято решение о переходе к загрузке x86 ОС на платформе «Эльбрус» в режиме UEFI.

Одним из базовых элементов UEFI является встроенный менеджер загрузки. При первичной установке ОС он формирует список блочных устройств, присутствующих в системе, и пытается произвести загрузку последовательно с каждого устройства из списка. В рамках создания UEFI-прошивки в бинарном трансляторе был реализован алгоритм работы менеджера загрузки и необходимые для его работы компоненты UEFI, в которые входят:

- компоненты, обеспечивающие доступ к блочным устройствам;
- компоненты, обеспечивающие доступ к файловой системе и файлам.

В режиме UEFI блочные устройства абстрактно представлены интерфейсами протокола Block I/O — структурами из переменных и указателей на функции. Любые внешние программы, включая менеджер загрузки, могут взаимодействовать с блочным устройством только через функции протокола Block I/O. Обычно он создается UEFI-драйвером контроллера устройства, но на этапе первичной установки ОС его должна создать прошивка.

Ранее в бинарном трансляторе для нужд BIOS были реализованы низкоуровневые драйверы нескольких типов устройств хранения данных — в виде класса `x86io_StorageDev_t` и его наследников. В рамках данной работы в бинарном трансляторе был создан дескриптор протокола Block I/O, хранящий адрес интерфейса протокола и указатель на соответствующее этому интерфейсу устройство, представленное объектом класса `x86io_StorageDev_t`. Функции протокола реализованы через методы класса с предварительным поиском устройства по переданному адресу интерфейса протокола. Также на основе Block I/O был реализован поддерживающий невыровненные обращения протокол Disk I/O. После добавления в систему интерфейсов данных протоколов для каждого распознанного бинарным транслятором устройства хранения данных менеджеру загрузки обеспечена возможность для формирования списка блочных устройств.

Для поиска на устройстве загрузчика ОС менеджер пользуется интерфейсами протоколов Simple File System и File. Используемый UEFI формат файловой системы FAT предполагает разбиение региона данных (памяти, где хранятся файлы) на кластеры. Для получения цепи кластеров, в которых расположен файл, используется таблица FAT. Необходимой для работы с файлами информацией является расположение FAT, корневой директории и региона данных, размеры кластера и сектора. Для ее хранения и дальнейшего использования в бинарном трансляторе была создана специальная структура, являющаяся частью дескриптора протокола Simple File System. Для реализации функций протокола File в бинарном трансляторе был создан класс с дублирующими функции методами, содержащий в том числе цепь кластеров файла и адрес интерфейса протокола Disk I/O, привязанного к разделу диска, содержащему файл — через его функции реализуются чтение и запись файла. Чтение директорий содержит дополнительное преобразование записи в директории FAT в специальную структуру, определяемую стандартом UEFI.

В итоге для поддержки алгоритма работы менеджера загрузки UEFI для случая установки ОС в бинарном трансляторе были реализованы четыре протокола UEFI. В результате была успешно произведена установка и загрузка x86 ОС семейства Linux (Ubuntu-23.10) на машине «Эльбрус-8С2».

Литература

1. Khudiakova E. V., Rozhin A. F. Implementation of the NVMe-controller driver in the binary compiler Elbrus-x86 // IX International Conference Engineering & Telecommunication En&T-2022. Book of Abstracts, 2022. P. 14–21.
2. UEFI Specification Version 2.0 // UEFI Forum. URL: <https://uefi.org/specifications>.
3. Microsoft Extensible Firmware Initiative FAT32 File System Specification. URL: <https://download.microsoft.com/download/1/6/1/161ba512-40e2-4cc9-843a-923143f3456c/fatgen103.doc>.



УДК 621.389

Комбинированное устройство термоиндикации на преимущественно отечественной элементной базе для систем холодовых цепей

Авдеев П. А., Татаринов Д. И.

Филиал РТУ МИРЭА в г. Фрязино

141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2А

Разработано устройство на базе микроконтроллера МК32. Приведены характеристики предлагаемого устройства. Показан вариант создания устройства термоиндикации с использованием преимущественно отечественной элементной базы.

Ключевые слова: МК32; термоиндикация; система холодовых цепей; отечественная компонентная база.

Термоиндикация в системах холодовых цепей играет определяющую роль в обеспечении качества и безопасности продукта, требующего определенного режима температурного хранения. Она позволяет отслеживать и записывать температуру продуктов в режиме реального времени с заданным временным диапазоном на всех этапах транспортировки и хранения.

Цель данной работы — сделать вывод о возможности создания устройства термоиндикации для систем холодовых цепей преимущественно на отечественной компонентной базе, для этого был сделан анализ подобных устройств, созданных на иностранной компонентной базе. В результате анализа были выявлены свойства, которыми должно обладать конкурентоспособное устройство подобного типа:

- сверхнизкое энергопотребление;
- погрешность измерений температуры не выше 0,5 °С;
- возможность установки временного интервала измерения температуры;
- возможность извлечения информации с устройства.

Было произведено схемотехническое моделирование на основе отечественного микроконтроллера МК32, в результате которого был получен прототип устройства. Также было создано программное обеспечение для управления данным устройством с применением алгоритмов по оптимизации энергопотребления устройства. В совокупности программного обеспечения и прототипа устройства было получено устройство термоиндикации с вышеуказанными свойствами. Был сделан вывод о возможности создания такого устройства преимущественно на отечественной компонентной базе.

Литература

1. Техническое описание МК32 // АО «Микрон». — URL: https://mikron.ru/upload/docs/mcu/Specification_RISC-V_AMUR_MIK32.pdf (дата обращения: 10.07.2024).
2. Alshdadi A. et al. An IoT Smart System for Cold Supply Chain Storage and Transportation Management // Engineering, Technology & Applied Science Research, 2024. Vol. 14. № 2. P. 13167–13172.

УДК 621.396

Разработка модели когерентного приемника сигналов с линейной модуляцией в среде SystemVue

Марков А. С.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
markov_rt@mail.ru

Работа посвящена созданию модели когерентного приемника в среде SystemVue для сигналов с линейной модуляцией. Модель включает формирователь сигнала, приемник высокочастотного сигнала и измеритель ошибок. Приведены результаты расчета диаграммы фазовых состояний для модуляций QPSK и 8-PSK.

Ключевые слова: МИЭТ; SystemVue; QPSK; 8-PSK; диаграмма фазовых состояний; Constellation.

Введение

Современные системы связи широко используют когерентные приемники, которые обеспечивают высокую чувствительность и надежность передачи данных. Когерентная обработка сигналов, основанная на синхронизации с сигналом передатчика, позволяет эффективно подавлять шумы и помехи, что особенно важно при ограниченном уровне сигнала или в условиях сложной среды распространения радиоволн (городские условия) [1, с. 106–108].

Целью данной работы является создание модели когерентного приемника для сигналов с линейной модуляцией в среде SystemVue.

Анализ параметров когерентного приема сигналов с линейной модуляцией производится в функциональной схеме, включающей формирователь идеального высокочастотного модулированного сигнала, приемник высокочастотного модулированного сигнала и измеритель битовой ошибки приема тестового информационного сигнала [2, с. 64–68].

Формирователь модулированного сигнала формирует идеальный тестовый высокочастотный модулированный сигнал без шумов и искажений в соответствии с информационной цифровой последовательностью и принятыми параметрами модуляции.

Функциональная схема приемника высокочастотного модулированного сигнала включает компоненты, параметры которых непосредственно влияют на достоверность приема информации для принятых характеристик радиоканала.

Измеритель битовых ошибок определяет относительную битовую ошибку при помощи сравнения исходной битовой последовательности, использованной в передатчике при формировании модулированного сигнала, и битовой последовательности на выходе приемника (детектора).

В модели (рис. 1) предполагается, что среда распространения радиоволн не искажает идеальный сигнал формирователя модулированного сигнала, т. е. является широкополосной (не искажает спектр сигнала), стационарной (параметры принимаемого сигнала неизменны в течение сеанса связи), однолучевой (принимается единственная копия излученного сигнала). Вносимый шум является аддитивным белым гауссовым шумом.



Рис. 1. Расчетная модель в SystemVue

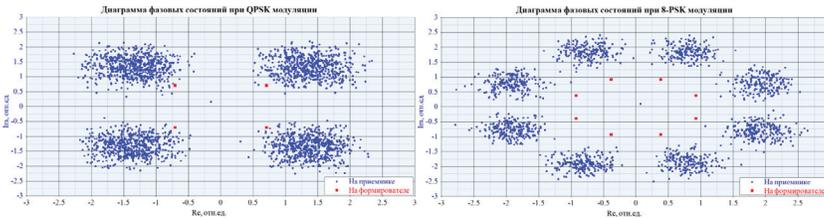


Рис. 2. Диаграмма фазовых состояний (слева — для QPSK-модуляции, справа — для 8-PSK-модуляции)

Работа формирователя модулированного сигнала и приемника представлена фазовыми состояниями комплексной огибающей (рис. 2). Рассеяние мгновенных значений квадратурных компонентов комплексной огибающей на диаграмме фазовых состояний невелико, это свидетельствует о том, что приемник синхронизирован с формирователем модулированного сигнала.

Заключение

Разработка модели когерентного приемника в среде SystemVue предоставляет удобный инструмент для изучения и оптимизации характеристик приемников сигналов с линейной модуляцией.

Литература

1. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь: Учебное пособие для вузов. — 3-е, изд., перераб. и доп. изд. — М.: Горячая линия — Телеком, 2023. — 518 с.
2. Галкин В. А. Приемно-передающие устройства для радиосетей передачи речи и данных: Учебное пособие для вузов. — 3-е, изд., перераб. и доп. изд. — М.: Горячая линия — Телеком, 2023. — 500 с.

УДК 621.3.049

Оптимизация сбора траекторного профиля программы методом инструментирования

Шампаров В. Е.^{1,2}¹ АО «МЦСТ»

117437, Москва, ул. Профсоюзная, 108

viktor.shamparov@yandex.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Для микропроцессоров «Эльбрус» в составе компилятора LCC реализовано траекторное профилирование программы в целях дополнительной оптимизации программ методами PGO. В данном докладе рассмотрены методы оптимизации профилирования. Данные оптимизации позволили ускорить работу профилируемой программы в среднем в 30,7 раз на задачах бенчмарков SPEC CPU1995, 2000, 2006.

Ключевые слова: компиляторы; PGO; Эльбрус; траекторное профилирование.

Одним из методов оптимизации программ является PGO (profile-guided optimization). Профилирование для PGO обычно выполняется методом инструментирования кода компилятором. При инструментировании неизбежно возникают накладные расходы на сбор профиля, часто заметно увеличивающие время работы профилируемой программы.

Одной из вариаций профилирования является траекторное профилирование (его различные варианты описаны в работах [1–4]). В ходе данного профилирования собирается информация о том, какие траектории часто выполняются в программе. В составе компилятора LCC для микропроцессоров с архитектурами «Эльбрус» и SPARC разработана программная система траекторного профилирования, близкая к описанной в работе [4], для улучшения некоторых оптимизаций, выполняемых в составе PGO.

Инструментирование и библиотека поддержки траекторного профилирования оптимизированы для минимизации накладных расходов профилирования. Используются следующие способы оптимизации:

- буферизация поступающих в библиотеку поддержки данных об узлах и дугах графа потока управления; данная оптимизация позволяет почти избавиться от накладных расходов на вызовы функций библиотеки поддержки;
- параллельная обработка буферов в библиотеке поддержки;
- разрежение обработки буферов с фактором N (обрабатывается только один набор буферов из N) или с растущим по простым числам фактором разрежения;
- оптимизация способа хранения собранного профиля в библиотеке поддержки, использующего трехуровневую хеш-таблицу для хранения счетчиков траекторий:
 - использование TNV-таблиц [5] вместо хеш-таблиц;
 - structure peeling в представлении TNV-таблиц;
 - оптимизация расположения данных ключей TNV-таблиц в едином буфере.



Измерение эффекта проведенных оптимизаций проводилось на компьютере с микропроцессором «Эльбрус-8СВ» на наборах бенчмарков SPEC CPU1995, SPEC CPU2000, SPEC CPU2006 [6]. Среднее геометрическое ускорение траекторного профилирования в результате перечисленных оптимизаций составило 30,7 раз.

Литература

1. Ball T., Larus J.R. Efficient Path Profiling // Proceedings of the 29th Annual ACM/IEEE International Symposium on Microarchitecture. IEEE Computer Society, 1996. P. 46–57.
2. D’Elia D.C., Demetrescu C. Ball-Larus Path Profiling across Multiple Loop Iterations // Proceedings of the 2013 ACM SIGPLAN International Conference on Object Oriented Programming Systems Languages & Applications. New York: Association for Computing Machinery, 2013. P. 373–390.
3. Marin G., Alexandrov A., Moseley T. Break Dancing: Low Overhead, Architecture Neutral Software Branch Tracing // Proceedings of the 22nd ACM SIGPLAN/SIGBED International Conference on Languages, Compiler, and Tools for Embedded Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2021. P. 122–133.
4. Roy S., Srikant Y.N. Profiling k-Iteration Paths: A Generalization of the Ball-Larus Profiling Algorithm // Proceedings of the 7th Annual IEEE/ACM International Symposium on Code Generation and Optimization. IEEE Computer Society, 2009. P. 70–80.
5. Calder B., Feller P., Eustace A. Value Profiling and Optimization // Journal of Instruction-Level Parallelism, 1999, Vol. 1. P. 1–37.
6. Официальный сайт консорциума SPEC. — URL: <https://www.spec.org/benchmarks.html#cpu> (дата обращения: 02.07.2024).

УДК 537.9

Разработка запоминающих устройств нового поколения на базе сегнетоэлектриков

к. ф.-м. н. Чуприк А. А.

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
chouprik.aa@mipt.ru

Представлены результаты разработки научно-технологических основ энерго-независимой памяти с недеструктивным считыванием на базе сегнетоэлектрических тонких пленок легированного оксида гафния, включая результаты инжиниринга многослойных структур элементов хранения, технологии формирования многослойной структуры элемента хранения в едином технологическом цикле, макет запоминающего устройства, физико-математических моделей для выполнения симуляции работы разрабатываемых элементов памяти и результаты экспериментальной характеристики устройств.

Ключевые слова: энергонезависимая память; сегнетоэлектрическая память; оксид гафния.

Среди концепций энергонезависимой памяти нового поколения, альтернативных флеш-памяти, сегнетоэлектрическая память представляет особенный случай, поскольку уже давно была выведена на рынок: энергонезависимая память с произвольным доступом (ferroelectric random access memory, FRAM) обладает наносекундным временем записи/чтения, очень низким энергопотреблением и почти неограниченным ресурсом перезаписи. Устройства FRAM на основе традиционных сегнетоэлектриков класса перовскитов выпускаются в мире в последние 20 лет по технологии вплоть до 90 нм. Вместе с тем проблемы с масштабированием и технологической совместимостью ограничивали область применения этих устройств нишевыми рынками. В результате исследования и разработки в направлении FRAM были прекращены в середине 2000-х гг., что положило конец буму сегнетоэлектрической памяти. Между тем, открытие в 2011 году сегнетоэлектрических свойств в легированных тонкопленочных слоях на основе HfO_2 и, в частности, сплавных пленках $\text{HfO}_2\text{-ZrO}_2$ возродило интерес исследователей и инженеров, поскольку эти материалы используются в современной КМОП-технологии в качестве подзатворных диэлектриков в полевых транзисторах и конденсаторах и сегнетоэлектрические материалы на их основе автоматически с ней совместимы. Поэтому разработка сегнетоэлектрической памяти на основе этого класса материалов потенциально может позволить преодолеть вышеуказанные проблемы.

Данная работа направлена на создание высокоплотной энергоэффективной энергонезависимой памяти на основе концепций памяти с недеструктивным типом считывания, которые позволят упростить архитектуру памяти, что, в свою очередь, позволит достичь высокой плотности ячейки памяти. С этой целью получили развитие следующие основные направления:

- подход, основанный на хранении данных в затворах сегнетоэлектрических полевых транзисторов FeFET;



- подход, основанный на использовании резистивных сегнетоэлектрических (FTJ) элементов для хранения данных.

Первый подход реализует концепцию, подобную флеш и позволяет реализовывать блочные накопители по NAND-схеме, что дает потенциальную возможность достижения плотностей, сравнимых с флеш, являющейся на данный момент лидером по плотности хранения данных среди твердотельных накопителей. Второй подход обеспечивает возможность создания двухтерминальных ячеек памяти с неструктуривным чтением и может быть использован для реализации энергоэффективной памяти с произвольным доступом, а также в перспективных смешанно-сигнальных схемах в качестве настраиваемых резисторов.

В статье представлены результаты разработки научно-технологических основ энергонезависимой памяти с неструктуривным считыванием на базе сегнетоэлектрических тонких пленок легированного оксида гафния. В частности, представлены результаты инжиниринга многослойных структур элементов хранения FeFET и FTJ (включая материалы слоев, их толщины и условия роста, параметры и условия отжига) и их геометрии, направленного на достижение высоких технических характеристик. Разработаны технология формирования многослойной структуры элемента хранения в едином технологическом цикле и конструктивно-технологические решения изготовления ячеек энергонезависимой памяти, включая выбор оптимальной концепции и топологии. Разработаны физико-математические модели для выполнения симуляции работы разрабатываемых элементов памяти, а также методики высокоскоростной характеристики ячеек памяти и экстракции физических параметров из экспериментальных данных. Изготовлены макеты энергонезависимых запоминающих устройств на основе сегнетоэлектрических материалов и представлены экспериментальные результаты измерения их технических характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-03-2024-117, проект № FSMG-2022-0031).

Литература

1. Böске T. S. et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // Applied Physics Letters, 2011. Vol. 99. № 10.

УДК 621.793.06

Принципы работы и возможности технологии аэрозольной печати для создания электронных устройств

Ефимов А. А., Лабутов Д. А., Патарашвили А. Н., Масленников Д. В., Арсенов П. В., Иванов В. В.

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
efimov.aa@mipt.ru*

Работа демонстрирует достижения в аэрозольной печати, показывая ее способность создавать функциональные структуры с детализацией до 10 мкм на различных подложках. Технология позволяет изготавливать высокоточные устройства для применения в таких отраслях, как микроэлектроника, энергетика, биомедицина и др.

Ключевые слова: печатная электроника; аэрозольная печать; наночастицы.

В результате проведенного исследования установлено, что аэрозольная печать представляет собой инновационную технологию, основой которой является нанесение материалов на разнообразные подложки посредством аэрозольных частиц. Эта технология открывает широкие возможности для создания функциональных структур и высокоточных устройств, применимых в различных отраслях промышленности [1].

Главный принцип аэрозольной печати заключается в формировании аэрозольного потока, состоящего из мельчайших частиц материала, который затем направляется на подложку с помощью струи газа. Процесс можно условно разделить на несколько этапов. Во-первых, материал, предназначенный для нанесения, преобразуется в аэрозольное состояние. Достижение этого возможно различными способами, включая ультразвуковое, пневматическое или электроэрозионное распыление. В результате получается мелкодисперсный аэрозоль, содержащий частицы размером от нескольких нанометров до десятков микрометров. Далее созданный аэрозоль направляется к печатающей головке через специальную систему трубок, обеспечивающих стабильность потока. Печатающая головка направляет аэрозоль на подложку, где частицы постепенно оседают и формируют нужную структуру. Благодаря высокой точности контроля перемещения головки и параметров аэрозольного потока можно получить структуры с разрешением до нескольких микрометров. На финальном этапе осажденный на подложке материал закрепляется различными методами, такими как термообработка, ультрафиолетовая сушка или химическое закрепление. Это обеспечивает прочное закрепление и функциональность нанесенного слоя.

Аэрозольная печать обладает рядом уникальных возможностей и преимуществ, делающих ее востребованной в различных высокотехнологичных отраслях: технология позволяет создавать структуры с разрешением до 10 мкм и меньше, что особенно важно для микроэлектроники и микроэлектромеханических систем (МЭМС); аэрозольная печать совместима с широким спектром материалов, включая металлы, полимеры, керамику и биоматериалы. Это позволяет применять ее в различных областях от нанотехнологий до биомедицины; технология может быть



использована для нанесения материалов на подложки различной природы, включая стекло, керамику, металл, пластик и гибкие материалы. Это открывает возможности для создания гибкой электроники и других современных устройств; аэрозольная печать обеспечивает высокую степень использования материала за счет точного локального нанесения, что сокращает отходы и снижает затраты на материалы. Кроме того, отсутствует необходимость использования агрессивных химических растворителей.

Применения аэрозольной печати:

1. Электроника и микроэлектроника:
 - создание тонкопленочных транзисторов, гибких дисплеев и других компонентов;
 - производство высокочастотных устройств и антенн.
2. Биомедицинские приложения:
 - печать биосенсоров и диагностических устройств, которые могут быть использованы для мониторинга здоровья и диагностики заболеваний;
 - создание биосовместимых материалов и 3D-печать структур для тканевой инженерии и регенерационной медицины.
3. Энергетика:
 - изготовление солнечных элементов и других устройств для преобразования энергии с использованием высокоэффективных материалов.
4. Сенсорные системы и носимые устройства:
 - производство гибких сенсоров для носимых гаджетов и медицинских устройств, которые могут мониторить различные показатели в реальном времени;
 - интеграция функциональных элементов в ткани для создания умных текстильных изделий.

В заключение заметим, что аэрозольная печать — это перспективная и многообещающая технология, открывающая широкие возможности для создания высокоточных и сложных структур в различных отраслях науки и техники. Ее уникальные преимущества, такие как высокое разрешение, гибкость в выборе материалов и возможность нанесения на различные подложки, делают ее все более популярной и востребованной в современном мире.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 22-79-10127, <https://rscf.ru/project/22-79-10127>.*

Литература

1. Wilkinson N. J., Smith M. A. A., Kay R. W., Harris R. A. A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing // *Advanced Manufacturing Processes*, 2019. Vol. 105. P. 4599–4619. DOI: 10.1007/s00170-019-03438-2.

УДК 621.383.52

Фотосенсорика средневолнового ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек

к. х. н. Попов В. С.

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Проведены экспериментальные работы по созданию фотосенсоров на основе коллоидных квантовых точек, обладающих чувствительностью в средневолновом ИК-диапазоне.

Ключевые слова: фотосенсор; MWIR; коллоидные квантовые точки; ККТ.

Разработкам фоточувствительных элементов на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) в последнее время уделяется большое внимание благодаря существенным преимуществам, которые обеспечивает их применение: упрощение технологии, снижение ограничений на шаг фоточувствительных элементов вплоть до дифракционного предела, снижение стоимости изготовления [1]. Для видимого и коротковолнового ИК-диапазонов за последние несколько лет достигнуты большие успехи, в частности на основе ККТ разработаны матрицы мегапиксельного формата, а также матрицы с предельным шагом фоточувствительных элементов 1,62 мкм [2].

Фотосенсорика средневолнового ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек только находится в стадии развития и пока не перешла к промышленным образцам. Основное внимание исследователей в этой области в настоящее время сфокусировано на поиске оптимального материала ККТ, разработке способов синтеза ККТ и их постсинтетической обработки поверхности, создании новых архитектур фоточувствительных элементов.

В лаборатории квантовой фотосенсорике МФТИ проводятся поисковые исследования, направленные на создание фоточувствительных структур на основе ККТ халькогенидов ртути, обладающих чувствительностью к излучению средневолнового ИК-диапазона (3–5 мкм). Проводимые работы имеют комплексный характер и затрагивают вопросы, связанные с синтезом ККТ и их постсинтетической обработкой, исследованием способов формирования фоточувствительных слоев, включая методы, пригодные для печатных технологий электроники, изучения фотосенсорных характеристик получаемых фоточувствительных структур.

В ходе проведенных работ исследованы зависимости характеристик ККТ от условий синтеза, разработаны новые методики синтеза, а также получения чернил на основе ККТ, пригодных для формирования фоточувствительных слоев методами печатной электроники, лабораторные методики формирования фоточувствительных элементов, стенд для исследования фотосенсорных характеристик в средневолновом ИК-диапазоне. В результате в настоящее время впервые в РФ получены фоточувствительные элементы на основе ККТ, обладающие чувствительностью в средневолновом ИК-диапазоне.

Литература

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., Razumov V. F. Russian Chemical Reviews, 2024, 93, RCR5113.
2. Попов В. С., Пономаренко В. П., Попов С. В. Прикладная физика. — 2023, 6, 45.



УДК 538.911, 538.915

Самосборка углеводородных молекул для получения новых аллотропов графена

Катин К. П.^{1,2}, Березницкий И. В.^{1,2}, Маслов М. М.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31*

² *НИИ проблем развития научно-образовательного потенциала молодежи
119620, г. Москва, ул. Авиаторов, 14-55
KPKatin@yandex.ru*

Методом молекулярной динамики исследован процесс самосборки углеводородных молекул на металлической подложке. Определена прочность, теплопроводность и проводимость полученных аллотропов.

Ключевые слова: графен; аллотропы; теория функционала плотности.

Как известно, запрещенная зона чистого графена имеет нулевую ширину, что не позволяет использовать этот материал в качестве полупроводника. С этим связан большой интерес к аллотропам графена, представляющим собой однослойные углеродные материалы с напряженной структурой, в которых углы между C-C-связями отличаются от 120° и образуют не только шестиугольники, но и другие фигуры. Компьютерный поиск показал, что существует множество аллотропов, некоторые из них по энергии отличаются от графена всего на несколько десятых электрон-вольта в расчете на один атом [1]. Многие из таких аллотропов являются полупроводниками [2] и могут использоваться в электронике [3]. Наиболее перспективным способом синтеза аллотропов представляется самосборка подходящих углеводородных молекул. Плоские молекулы могут быть ориентированы подходящим образом за счет притяжения к металлической подложке, что упрощает их самосборку. Таким способом уже были успешно синтезированы некоторые аллотропы.

В рамках настоящего доклада мы обсуждаем общие требования к структуре молекул, из которых может собираться 2D-материал. На основе этих требований предлагаются подходящие прекурсоры. Процесс их превращения в 2D-материал на поверхности золота, серебра и меди исследуется при помощи молекулярной динамики. Электронная структура, прочность и теплопроводность получившегося 2D-материала исследуются в рамках PBE-GGA-подхода. Показано, что его упругие константы близки к характерным значениям, полученным ранее для графинов [4].

Создание новых аллотропов графена расширит возможности для применения этого материала в электронике.

Работа поддержана РФФ (проект 23-23-00432).

Литература

1. Wang Z., Zhou X.-F., Zhang X., Zhu Q., Dong H., Zhao M., Oganov A. R. Phagraphene: A Low-Energy Graphene Allotrope Composed of 5–6–7 Carbon Rings with Distorted Dirac Cones, *Nano Lett.* 15 (2015) 6182–6186.
2. Maździarz M., Mrozek A., Kuś W., Burczyński T. Anisotropic-Cyclicgraphene: A New Two-Dimensional Semiconducting Carbon Allotrope, *Materials* 11 (2018) 432.



3. Tromer R. M., Pereira M. L. Júnior, Lima K. A. L., Fonseca A. F., da Silva L. R., Galvão D. S., Ribeiro Luiz A. Junior, Mechanical, Electroni. and Optical Properties of 8-16-4 Graphyne: A 2D Carbon Allotrope with Dirac Cones // J. Phys. Chem., 2023. C 127. 12226–12234.
4. Polyakova P. V., Murzaev R. T., Lisovenko D. S., Baimova J. A. Elastic constants of graphane, graphyn. and graphdiyne // Computational Materials Science, 2024. 244. 113171.



УДК 621.385.032; 537.533.2

Разработка масштабируемого управляемого автоэмиссионного источника электронов на основе углеродных наноматериалов

Сень В. В., к. ф.-м. н., Порохов Н. В., к. т. н., Филиппов И. А., Мумляков А. М., к. т. н., Ануфриев Ю. В., Шибалов М. В., Рыков А. С., Аниканов А. А., Красильников М. И., Шевченко А. Р.

*Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук
115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А, стр. 3
kb1nic@mail.ru*

Разработана технология изготовления масштабируемого управляемого автоэмиссионного источника электронов на основе углеродных наноматериалов, позволяющего получать электронный пучок произвольной формы с плотностью тока не менее $0,07 \text{ А/см}^2$ после вытягивающего электрода. Разработанная технология позволяет изготавливать автоэмиссионные источники электронов электровакуумных микроприборов на коммерчески доступном серийном оборудовании для производства полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: вакуумная электроника; углеродные наноматериалы; автоэмиссия; источник электронов.

Так как в частотном диапазоне более 100 ГГц у традиционных полупроводниковых приборов и интегральных схем происходит падение эффективности и уровня выходной мощности, одним из перспективных вариантов решения данной проблемы является разработка миниатюрных электровакуумных СВЧ-приборов на основе автоэмиссионных катодов. Кроме того, автоэмиссионные приборы имеют значительно более высокую стойкость к ионизирующему облучению, чем традиционные полупроводники, так как основаны на другом принципе работы и теряют работоспособность только при физическом разрушении конструкции прибора.

Применение автоэмиссионных острых структур Спиндта ограничено необходимостью поддержания высокого уровня вакуума (10^{-7} Торр и более) для защиты катодных элементов от ионной бомбардировки, а большая величина шунтирующей емкости катодно-сеточного узла таких конструкций приводит к образованию значительных токов утечки в структуре катод — сетка, что сильно ограничивает рабочую частоту такой конструкции.

Применение конструкций с катодами на основе углеродных наноматериалов (УНМ) сдерживается отсутствием комплексных решений в части сопряжения высокотемпературных технологических процессов синтеза УНМ с изготовлением других узлов электровакуумных микроприборов.

В рамках данной работы были разработаны масштабируемые управляемые автоэмиссионные источники электронов на основе УНМ с выходной плотностью тока электронного пучка не менее $0,07 \text{ А/см}^2$, работающие при давлении остаточных газов $2 \cdot 10^{-6}$ Торр. Конструкция и технология изготовления катодного [1] и вытягивающего узлов данного источника электронов позволяют решить ряд ключевых проблем:

- 1) минимизация зазора катод — вытягивающий электрод;
- 2) провисание и разрушение вытягивающего электрода из-за нагрева в результате перехвата части электронного пучка;



- 3) неравномерное распределение токовой нагрузки по всей поверхности автокатода;
- 4) минимизация разрушения поверхности автоэмиссионных катодов из-за ионной бомбардировки;
- 5) минимизация токов утечки в структуре катод — вытягивающий электрод;
- 6) быстрая адаптация размеров источника электронов под требования разработчика электровакуумных приборов.

Полученный научно-технологический задел необходим для разработки и изготовления широкого спектра вакуумных микроприборов.

Литература

1. Мумляков А. М., Першина Е. А., Шибалова А. А., Шибалов М. В., Ануфриев Ю. В., Филиппов И. А., Сень В. В., Тархов М. А. Исследование гибридной структуры p-алмаза и углеродных наностенок, синтезированной методом RF-PECVD // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2023. — Т. 16. — № 3.2. — С. 211–216.

УДК 547.279.2

О результатах работы лаборатории фоточувствительных и электроактивных материалов по разработке компонентов для химически усиленных фоторезистов. От колбы до реактора

Кузнецов И. Е.¹, Заморещков Д. С.¹, Сидельцев М. Е.¹, Новиков А. С.¹,
Лолаева А. В.¹, Кузнецова Н. А.^{1,2}, Малков Г. В.¹, Аккуратов А. В.¹

¹ ФИЦ ПХФ и МХ РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
akkuratow@yandex.ru

² АО «НИОПИК»

123001, г. Москва, ул. Большая Садовая, 1, корп. 4

В данной работе систематизированы исследования молодежной лаборатории ФИЦ ПХФ и МХ РАН, образованной в 2022 году, по разработке простых подходов к получению функциональных материалов для российских фоторезистов. Проведена отработка синтеза трифенилсульфоний трифлата, бис(трет-бутилфенил)йодоний трифлата и производных норборнендикарбоксимида в килограммовых количествах. Создан задел по синтезу адамантансодержащих мономеров для полимерной основы фоторезистов 193 нм.

Ключевые слова: трифенилсульфониевые соли; дифенилйодониевые соли; адамантан; фоторезист; фотолитография.

Введение

Производство микроэлектроники методом литографии в глубоком ультрафиолете проводится с использованием большого количества разнообразных материалов [1]. Важное место среди них занимают фоторезисты (ФР) с химическим усилением. В составе современных ФР есть фотогенератор кислоты (ФГК) и полимер, зачастую включающий звенья на основе метакрилатных производных каркасных алициклов. Лабораторные методы получения большинства ФГК, а также сложных эфиров метакриловой кислоты основаны на сложных и трудномасштабируемых синтетических методах [2, 3], что ограничивает доступность ФР и делает его стоимость чрезвычайно высокой.

Реакторный синтез перспективных ФГК и метилметакрилатов на основе адамантанов и изоборнеола

В ходе работы систематически оптимизированы условия для получения трифенилсульфоний трифлата (PAG 1), бис(трет-бутилфенил)йодоний трифлата (PAG 2), нафторбутансульфоната норборнендикарбоксимида (PAG 3), а также 2-метиладамантан-2-ил метакрилата (рис. 1).

Преимущество предложенных подходов заключается не только в сокращении количества синтетических стадий, но и в использовании недорогих и доступных реагентов. К примеру, на финальной стадии ацилирования соединения 7 мы смогли исключить применение комбинации органического основания и катализатора (триэтиламин и *N,N*-диметиламинопиридин) и заменить их на водный раствор карбоната натрия. Синтез сульфониевых и йодониевых фотосолей предложено проводить по модернизированным схемам без низкостабильных магнийорганических реактивов и йодаренов. Важнейшим результатом стало определение оптимальных

условий для ацилирования стерически затрудненных адамантолов. Детальное исследование более 18 различных систем позволило подобрать действенный метод воспроизводимого получения 2-метиладамантан-2-ил метакрилата. Данная методика была адаптирована для синтеза мономеров, содержащих изоборнильные, миртанильные и пиненовые каркасные фрагменты.

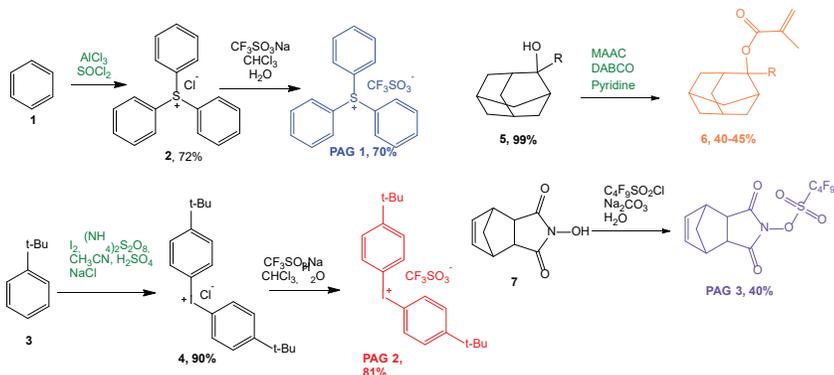


Рис. 1. Получение ФГК PAG 1-3 и 2-метиладамантан-2-ил метакрилата в оптимизированных условиях для реакторного синтеза

Заключение

Осуществлен успешный переход от лабораторного синтеза ФГК и мономеров на основе алициклов к их реакторному производству. В случае сульфониевых и йодониевых солей выход продуктов с одного цикла достигает до 1 кг. Ожидается, что дальнейшее масштабирование синтеза данных материалов в соответствии с разработанными методиками не вызовет трудностей, что, в свою очередь, сделает фоторезисты доступными для потребителя.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (122111700041-8).

Литература

1. Quero J. M., Perdignes F., Aracil C. Microfabrication technologies used for creating smart devices for industrial applications // Smart Sensors and MEMS: Intelligent Devices and Microsystems for Industrial Applications (Sec.Ed.) Ed. by Nihtianov S. and Luque A., 2018. P. 291–311.
2. Hossain Md. D, Ikegami Y. and Kitamura T. Reaction of Arenes with Iodine in the Presence of Potassium Peroxodisulfate in Trifluoroacetic Acid. Direct and Simple Synthesis of Diaryliodonium Triflates // J. Org. Chem., 2006. Vol. 71. P. 9903–9905.
3. Патент CN 104628561 A, КНП. Resist Composition, Preparation method for 2-ethyl-2-adamantanol methacrylate / Fr Zhiwei; заявитель и патентообладатель — Shanghai Bokang Fine Chemical CO., LTD.; заявл. 11.11.2013; опубл. 20.05.2015.



УДК 615.47

Миниатюризация биомедицинской электроники

Пьянов И. В., к. ф.-м. н.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Описана эволюция биомедицинской электроники на примерах систем длительной механической поддержки кровообращения, аппаратов «искусственная почка», кардиостимуляторов, миниатюризация которых способствовала повышению качества жизни пациентов.

Ключевые слова: биомедицинская электроника; искусственные органы; аппарат вспомогательного кровообращения; аппарат «искусственная почка»; электрокардиостимулятор; миниатюризация.

Медицинские устройства значительно различаются как по функционалу, так и по массогабаритным характеристикам: от элементарных диагностических инструментов до мультиспиральных компьютерных томографов и искусственных органов. Несмотря на различное назначение медицинских устройств (профилактика, диагностика, лечение или реабилитация), все они связаны с системой «медицинский работник – пациент». При разработке медицинского устройства, независимо от его сложности, важнейшими факторами являются его функционал, качество, безопасность и удобство использования как врачом, так и пациентом. Актуальной задачей при создании персонализированных, носимых и имплантируемых биомедицинских систем является их миниатюризация.

Долгое время проектирование и производство миниатюрных медицинских устройств сдерживалось ограничениями традиционного микроэлектронного производства. Уже более 50 лет разработчикам известен закон Мура, значение которого для технологического прогресса нельзя недооценить. Его влияние затрагивает вычислительную мощность, скорость и миниатюризацию устройств, включая и биомедицинскую электронику. В прошлом остались громоздкие печатные платы, сильно влиявшие на размеры изделия. Современные биомедицинские электронные устройства проектируются так, чтобы отвечать требованиям безопасности, функциональности, эргономики, в т. ч. исходя из удобства пользования.

Производители медицинских устройств широко применяют методы и процессы миниатюризации как для повышения эффективности существующих продуктов, так и для разработки новых устройств. Если описать концепт разработки и дизайна современной носимой биомедицинской электроники, то можно отметить оптимизацию размера, веса и мощности, а также стоимости конечного продукта.

Современные технологии позволяют создавать миниатюрные имплантируемые устройства. Хорошо зарекомендовал себя самый маленький в мире электрокардиостимулятор Medtronic Micra длиной всего 24 миллиметра [1].

Особенно следует отметить эволюцию биомедицинской электроники на примерах систем длительной механической поддержки кровообращения, которые за последние 40 лет прошли путь от частично имплантируемых насосов весом свыше 1 килограмма и массивным блоком электронного управления, для перемещения которого была необходима посторонняя помощь, до современных аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца весом менее 100 граммов

с компактным блоком управления, располагающимся на поясе или в наплечной сумке. А разработанная в России уменьшенная модель аппарата вспомогательного кровообращения АВК-Н «Спутник», успешно применяемого в России с 2012 года для взрослых, дает возможность имплантировать его даже самым маленьким пациентам [2]. Миниатюризация системы кровообращения позволяет снизить инвазивность процедуры имплантации и расширяет возможности ее применения для пациентов с меньшими габаритами тела, чем у людей с ростом от 160 сантиметров и массой тела от 50 килограммов.

Разработка носимых аппаратов «искусственная почка» позволяет пациентам с хронической почечной недостаточностью проводить диализ «на ходу», преодолевая проблему долгих часов терапевтической процедуры и необходимости подключения к крупногабаритным стационарным аппаратам гемодиализа [3].

Миниатюризация не только положительно повлияла на имплантируемые устройства, но и повысила качество и эффективность других медицинских устройств, включая портативные и мобильные системы визуализации, хирургическую робототехнику и диагностику *in vitro*.

Вместе с тем, следует отметить, что миниатюризация биомедицинской электроники имеет и ряд проблем, в частности актуальными становятся вопросы рассеяния тепла и потребления энергии. Учёными и инженерами разрабатываются новые аккумуляторные технологии, ведутся работы по созданию систем беспроводной передачи энергии для питания имплантируемых медицинских устройств.

Таким образом, миниатюризация носимой биомедицинской электроники является актуальной задачей биомедицинской инженерии, от решения которой зависит успешность исхода лечения, а также комфорт врачей и пациентов.

Литература

1. Ritter P., Duray G. Z., Zhang S. et al. The rationale and design of the Micra Transcatheter Pacing Study: safety and efficacy of a novel miniaturized pacemaker / Europace, 2015. May; 17(5): 807-13. DOI: 10.1093/europace/euv026.
2. Гринвальд В. М., Кузьмин Г. С., Маслобоев Ю. П. и др. Первый отечественный аппарат вспомогательного кровообращения АВК-Н «СПУТНИК» на основе имплантируемого насоса крови // Известия вузов. Электроника, 2015. — № 5. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pervyy-otechestvennyy-apparat-vspomogatelnogo-krovoobrascheniya-avk-n-sputnik-na-osnove-implantiruемого-nasosa-krovi> (дата обращения: 09.09.2024).
3. Базаев Н. А. Особенности построения автономной носимой аппаратуры искусственного очищения крови // Известия вузов. Электроника, 2020. — № 3. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-postroeniya-avtonomnoy-nosimoy-apparatury-iskusstvennogo-ochischniya-krovi> (дата обращения: 09.09.2024).

**Производство книг на заказ
Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
125319, Москва, а/я 91
тел.: (495) 234-01-10
e-mail: knigi@technosphera.ru**

Реклама в книгах:

- модульная
- статьи

**Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosphera.ru>**

**Российский форум «Микроэлектроника 2024»
10-я Научная конференция
«ЭКБ и микроэлектронные модули».
Сборник тезисов**

**Научно-технологический университет «Сириус»,
23-28 сентября 2024 г.**

Компьютерная верстка – ИП Автушенко Р.В.
Дизайн – Н.И. Семячкина
Ответственный за выпуск – С.А. Орлов

Подписано в печать 20.09.2024
Формат 60×90/16
Гарнитура «Ньютон»
Печ. л. 95,5.

Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2

ПАРТНЕРЫ РОССИЙСКОГО ФОРУМА «МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2024»

10 лет вместе!

При поддержке



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЭЛЕМЕНТ

Организаторы



ПРОГРЕСС
НИИ микроэлектронной аппаратуры

Генеральные партнеры



ФОНД ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Атомный партнер



Технологический партнер



РОССИЙСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Инновационные партнеры



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



OpenYard

Партнер Научной конференции



Образовательный партнер



СИРИУС
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

Стратегический информационный партнер



Партнеры Школы молодых ученых



ЭЛЕМЕНТ



Спортивный партнер



ГК «ЭЛЕМЕНТ»

Партнеры



АО «АИСА ИТ-Сервис»



ТУСУР
TUSUR UNIVERSITY



Алмаз - Антед



Российский научный фонд



НИИМ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР



АПЬЯНС
RISC-V



МИСФИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР



группа компаний



Партнер воды



СИГНАЛТЕК

Партнер детской программы



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Партнер сувенирной продукции



Генеральный информационный партнер



ТЕХНОСФЕРА
РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР

Оператор Форума



Профконференция



MICROELECTRONICA.PRO

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ И БУДЬТЕ В КУРСЕ
ВСЕХ ПОСЛЕДНИХ НОВОСТЕЙ!