



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

# МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

15-я Международная  
научно-практическая конференция  
по физике и технологии  
наногетероструктурной СВЧ-электроники

22–23 мая 2024 года

МОСКВА

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

---

# МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

15-я Международная  
научно-практическая конференция  
по физике и технологии  
наногетероструктурной СВЧ-электроники

22–23 мая 2024 года

СБОРНИК ТРУДОВ

Москва

Open Readings named after RAS  
Corresponding Member,  
Professor V.G. Mokerov

XV International Conference  
on Physics and Technology  
of Nanoheterostructure Microwave Electronics

May 22–23, 2024

Conference Proceedings

УДК 621.382(06)+539.2(06)+620.3(06)  
ББК 22.36в6  
М 74

**Мокеровские чтения.** 15-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 22–23 мая 2024 года.: сборник трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. – 194 с.

Тематика конференции объединила работы ведущих исследователей из России и стран СНГ по целому ряду научно-технических и технологических задач в области гетероструктурной СВЧ-электроники и смежных областей. Это разделы: моделирование и свойства материалов наногетероструктурной СВЧ электроники; радиофотоника и оптоэлектроника; компонентная база и устройства СВЧ электроники: производство, технологии и свойства; терагерцовая электроника и фотоника; перспективные наноматериалы и наносистемы; структурные свойства и нанометрология наносистем и гетероструктур; функциональные материалы для электроники и сенсоров.

Материалы докладов подготовлены сотрудниками различных учреждений: институтов РАН, представителями производственных организаций и университетов, и отражают современное состояние и пути развития проблем твердотельной электроники и оптоэлектроники на основе наноразмерных гетероструктур и других новых функциональных материалов. Тезисы докладов размещены в тематических секциях в соответствии с программой конференции.

Конференция проводится ежегодно при участии Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Фонда поддержки науки и образования имени В.Г. Мокерова и Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН.

Сайты конференции:

<https://mokerov.mephi.ru> / <https://mokerov.com/> (раздел «Мокеровские чтения») Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»:  
[www.mephi.ru](http://www.mephi.ru)

Фонд поддержки образования и науки имени члена-корреспондента РАН,  
профессора В.Г. Мокерова:  
<https://mokerov.com/>

Федеральное государственное автономное научное учреждение  
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники  
имени В.Г. Мокерова Российской академии наук:  
[www.isvch.ru](http://www.isvch.ru)

Материалы получены до 1 апреля 2024 г. Сборник трудов издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-3057-3

© *Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ», 2024*

The XV International Conference on Physics and Technology of Nanoheterostructure Microwave Electronics (In honour of RAS Corresponding Member, Professor V.G. Mokerov).

The Conference unites leading scientists and technologists working on the wide range of problems in the field of heterostructure microwave electronics and related topics. The Conference speakers represent various organizations: the Institutes of the Russian Academy of Sciences, the Industrial institutions, the Universities. The presentations reflect the modern state and development of microwave electronics based on nanoheterostructures and other advanced functional materials.

Abstracts are combined into thematic sections corresponding to the conference program. The sections are: Fundamentals of nanoheterostructure microwave electronics; Semiconductor microwave devices: fabrication, technology and performance Advanced materials, Heterostructures and superlattices, two-dimensional, one-dimensional and zero-dimensional structures; Functional electronics and Optoelectronics, Terahertz photonics.

Conference sites:

<https://mokerov.mephi.ru/> / <https://mokerov.com/>

National Research Nuclear University «MEPhI»  
[www.mephi.ru](http://www.mephi.ru)

Education and Science Support Foundation named after Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor V.G. Mokerov  
<https://mokerov.com/>

V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS  
[www.isvch.ru](http://www.isvch.ru)

Proceedings were received before 01.04.2024.  
Proceedings are published as received with no editing.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

---

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРНОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ

БОГДАНОВ С.А., КАРПОВ С.Н., КОТЕКИН Р.А., ПАШКОВСКИЙ А.Б. Гетероструктура с цифровыми потенциальными барьерами для малолумящих полевых транзисторов .....	13
РОДИОНОВ Д.А., ЗАГОРОДНЕВ И.В. Сильно экранированные двумерные магнитоплазмоны и волны на мелкой воде в латерально ограниченных системах .....	15
СИБИРМОВСКИЙ Ю.Д., МУЗЫКИНА Е.А. Моделирование транспорта квазидвумерных электронов в слое квантовых точек или квантовых колец во внешнем поле методом траекторий .....	17
ЩЕРБАКОВ Л.А., КЛОЧКОВ А.Н., ВИНИЧЕНКО А.Н., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., КАРГИН Н.И. Спектры фотолуминисценции односторонне легированных наногетероструктур AlGaAs/InGaAs с различной концентрацией электронов .....	19

### РАДИОФОТОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

ЛАВРУХИНА Е.А., БОБРОВ А.И., НЕЖДАНОВ А.В., СИДОРЕНКО К.В., ХОМИЦКИЙ Д.В. Современное состояние интегральных электрооптических модуляторов, работающих на различных механизмах .....	21
ЛЕМЕСШЕВСКАЯ Г.А., ГОРШКОВ А.П., НЕЖДАНОВ А.В., СКРЫЛЕВ А.А., БОБРОВ А.И., СИДОРЕНКО К.В., КЛЕМЕНТЬЕВ Д.С., МАЛЕХОНОВА Н.В. Верификация термооптического элемента в кремниевых ФИС .....	23
НЕЖДАНОВ А.В., СИДОРЕНКО К.В., ВОЛКОВ П.В., ВЯЗАНКИН О.С., СКРЫЛЕВ А.А., БОБРОВ А.И., ГОРШКОВ А.П., КЛЕМЕНТЬЕВ Д.С., МАЛЕХОНОВА Н.В., ЛЕМЕСШЕВСКАЯ Г.А. Моделирование и анализ работы кремниевых делителей оптического сигнала в фотонных интегральных схемах .....	25
ХАЗАНОВА С.В., БОБРОВ А.И., ГОРШКОВ А.П., СИДОРЕНКО К.В., МАЛЕХОНОВА Н.В., БАЙДУСЬ Н.В., ПАНФИЛОВ А.С. Штарковский сдвиг поглощения в InGaAs/GaAs напряженных туннельно-связанных квантовых ямах .....	27
ХАЗАНОВА С.В., БОБРОВ А.И., ГОРШКОВ А.П., СИДОРЕНКО К.В., НЕЖДАНОВ А.В., ПАНФИЛОВ А.С. Расчет показателя преломления в GE/SIGE квантовых ямах для проектирования модулятора Маха-Цендера .....	29

КУЛАГИН В.В., ВАЛУЕВ В.В., КАРГИН Н.И., РЫЖУК Р.В., ЧЕРЕПЕНИН В.А. Многоканальный радиофотонный сверхширокополосный приемник .....	31
РЫЖУК Р.В., БУРКИТБАЕВ Д., ВАЛУЕВ В.В., ГРИШАКОВ К.С., КАРГИН Н.И., КУЛАГИН В.В. Определение угловой координаты источника сигнала с использованием радиофотонного приемного канала .....	33
ГРИШАКОВ К.С., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С. Расчет и оптимизация торцевого ввода света в фотонные интегральные схемы на технологической платформе InP .....	35
НОМОЕВ С.А., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ВИНИЧЕНКО А.Н., КЛОЧКОВ А.Н. Спектральные характеристики фотопроводящей терагерцовой антенны с плазмонными прямоугольными наноантеннами и наностержнями .....	37
УЛЬЯНОВ Я.В., ЧЕШЕВ Е.А., РУДЫЙ А.В., МАВРЕШКО Е.И., ДИАНОВ С.В. Исследование лазерных свойств отечественной композитной керамики Nd <sup>3+</sup> : YAG/Cr <sup>4+</sup> : YAG для импульсных лазеров .....	39
СИГЛОВАЯ Н.В., КАРГИН Н.И., РЫНДЯ С.М., СУЛТАНОВ А.О., ДЕЙНЕКО С.С. Синтез фотонных структур на основе диоксида кремния .....	41
ЛУКЪЯНЕНКО Д.В., РЫНДЯ С.М. Компьютерное моделирование поляритонных лазеров .....	43
МИНИН И.В., МИНИН О.В. Генератор электромагнитного шума на основе Фано резонанса в замерзающей капле воды .....	45
ПЕТРОШЕНКО И.А., ЦУКАНОВА Е.Е., СЫЧЕВ А.А., КЛОКОВ В.А., КАРГИН Н.И. Особенности применения и методы интеграции MATLAB-функций при проектировании PSK модемов на базе ПЛИС для систем связи .....	47
<b>КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА И УСТРОЙСТВА СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ: ПРОИЗВОДСТВО, ТЕХНОЛОГИИ И СВОЙСТВА</b>	
ЦУНВАЗА Д., РЫЖУК Р.В., НЕВОЛИНА Т.Н., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., КЛОКОВ В.А., КАРГИН Н.И. Исследование температурных характеристик пассивных элементов на основе гетероструктуры соединений АПAs .....	49
МАНСУРОВ В.Г., МАЛИН Т.В., МИЛАХИН Д.С., ЗЕМЛЯКОВ В.Е., ЕГОРКИН В.И., ГУМИНОВ Н.В., ЖУРАВЛЕВ К.С. Влияние in situ пассивирующего слоя SiN на коллапс тока в AlGaN/AlN/GaN (HEMT) .....	51
КОЛОСОВСКИЙ Д.А., БЕКРЕЕВА Д.В., ЗАЛЯЛОВ Т.М., ПОНОМАРЁВ С.А., ШУХОВ Ю.Г., МОРОЗОВ А.А., СТАРИНСКИЙ С.В. Нанесение методом импульсной лазерной абляции сверхтонких пленок золота на подложки кремния и кварца .....	53

ТОРХОВ Н.А.

Электрические характеристики истинно одномерных 1D-контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки ..... 55

КУЛИШ А.М., ЛОСЕВ В.В., КОНДРАТЕНКО А.В., СОРВАЧЕВ П.С.

Интегральный малошумящий усилитель X-диапазона частот..... 57

МЕЛЬНИКОВ Д.В., ГОРШКОВА Н.М.

Эквалайзер для высокоскоростного канала приема данных ..... 59  
ЗАНАВЕСКИН М.Л.

Разработка технологии СВЧ МИС на основе гетерозпитаксиальных структур нитрида галлия на пластинах кремния с топологической нормой 0,15 мкм..... 61  
САУРИ А.Д., КЛОКОВ В.А., КАРГИН Н.И.

Широкополосная антенная решетка на основе патч антенн с емкостной связью для применения в SAR С-диапазона и сетях 5G ..... 63

## ТЕРАГЕРЦОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОНИКА

ВАКС В.Л., АНФЕРТЬЕВ В.А., ДОМРАЧЕВА Е.Г., ЧЕРНЯЕВА М.Б.

Квантовые каскадные лазеры ИК и ТГц диапазонов для спектроскопии ..... 65  
ЖМУДЬ Б.А., СОБОЛЕВ А.С., ХАБИБУЛЛИН Р.А.

Потери в двойном металлическом волноводе квантово-каскадного лазера, рассчитанные модифицированным методом Маркатили ..... 67

ЛАВРУХИН Д.В., ЯЧМЕНЕВ А.Э., ГОНЧАРОВ Ю.Г., ЗАЙЦЕВ К.И.,

СПЕКТОР И.Е., ПОНОМАРЁВ Д.С.

Новые подходы к оптимизации фотопроводящих антенн для генерации и детектирования ТГц излучения ..... 69

КЛИМОВ Е.А., КЛОЧКОВ А.Н., СОЛЯНКИН П.М., СИНЬКО А.С.,

ПАВЛОВ А.Ю., ЛАВРУХИН Д.В., ПУШКАРЁВ С.С.

Генерация ТГц-излучения множественными псевдоморфными квантовыми ямами {InGaAs/GaAs} с ориентацией (100), (110) и (111)A и фотопроводящими антеннами на их основе ..... 71

ШТРАЙХ Р.С., ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЛАДУГИН М.А.

Моделирование резонансно-фононных зонных дизайнов квантово-каскадных лазеров для генерации в терагерцовом диапазоне ..... 73

ГАРАБОВ Д.В., ГАЛИЕВ Р.Р., ПОНОМАРЁВ Д.С.

Особенности жидкостного химического травления меза-изоляции в LT-GaAs по маске резиста, созданной методом электронно-лучевой литографии ..... 75

ПРОКОПЬЕВА Л.С., КЛОЧКОВ А.Н., ВИНИЧЕНКО А.Н.,

ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., КАРГИН Н.И., КЛИМОВ Е.А., ГАЛИЕВ Г.Б.,

КУЗНЕЦОВ К.А., КОВАЛЕВА П.М.

Зависимость амплитуды терагерцового излучения полупроводниковых пленок на основе арсенида индия от угла поворота плоскости поляризации лазерной накачки ..... 77



РОМАНОВ С.А., УШАКОВ А.А., МАМАЕВА К.А., ДОЛМАТОВ Т.В., ЧИЖОВ П.А., ШЕВЛЮГА В.М., БУКИН В.В., ГАРНОВ С.В. Генерация терагерцового излучения при сверхсветовой разрядке плоского вакуумного фотодиода .....	79
ГАВРИЛЕНКО Д.В., ТИЩЕНКО А.А. Когерентное усиление обратного томсоновского рассеяния в терагерцовом диапазоне .....	81
СИНИЦКИЙ С.Л., АРЖАННИКОВ А.В., КУЗНЕЦОВ С.А., КАЛИНИН П.В., МАКАРОВ М.А., САМЦОВ Д.А., САНДАЛОВ Е.С., СТЕПАНОВ В.Д. Спектральная диагностика мощных потоков излучения в интервале частот 0,07–1,2 ТГц .....	83
САНДАЛОВ Е.С., СИНИЦКИЙ С.Л., АРЖАННИКОВ А.В., МЕЩЕРЯКОВ И.Н., СКОВОРОДИН Д.И., НИКИФОРОВ Д.А., ПАВЛЮЧЕНКО В.А., САМЦОВ Д.А., ЛОГАЧЕВ П.В., БАК П.А., ГИНЗБУРГ Н.С., ПЕСКОВ Н.Ю. Электронно-оптическая система ЛСЭ-генератора СУБ-ГВТ потока терагерцового излучения на основе электронного пучка линейного индукционного ускорителя .....	85
ПЛЕХАНОВ А.А., АКМАЛОВ А.Э., КОТКОВСКИЙ Г.Е., КУЗИЩИН Ю.А., МАРТЫНОВ И.Л., ОСИПОВ Е.В., ЧИСТЯКОВ А.А. ТГц визуализация частиц органических веществ .....	87

#### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОСИСТЕМЫ

ХОМЕЦ А.Л., САФРОНОВ И.В., ФИЛОНОВ А.Б., МИГАС Д.Б. Влияние фонон-интерфейсного рассеяния на продольную теплопроводность слоистых пленок Si/Ge(111) .....	89
КУШНИР В.Н., ПРИЩЕПА С.Л. Критические температуры наноструктур сверхпроводник/графен .....	91
ДРОНИНА Е.А., КОВАЛЬЧУК Н.Г., ДАНИЛЮК А.Л., ПРИЩЕПА С.Л. Интерфейсные зарядовые состояния в гетеропереходах осунт/кремний .....	93
ДРОНИНА Е.А., КОВАЛЬЧУК Н.Г., ЛУЦЕНКО Е.В., ДАНИЛЬЧИК А.В., ПРИЩЕПА С.Л. Температурные зависимости параметров барьера Шоттки осунт/кремний .....	95
ДРОНИНА Е.А., КОВАЛЬЧУК Н.Г., ГАЙДУК П.И., ПРИЩЕПА С.Л. Исследование методом ИК спектроскопии пленки из одностенных углеродных нанотрубок .....	97
ТОРХОВ Н.А. Процессы самоорганизации гидратированных комплексов фуллерена $C_{60}@ \{H_2O\}_n$ в водных коллоидных растворах .....	99
ДРИНЕВСКИЙ А.С., ЗЕЛКОВСКИЙ Е.А., КАРПИЛОВА Е.С., ЛАБУНОВ В.А., КАРГИН Н.И., РАДИОК Д.В. Свойства ибупрофен-серебряно-графеновых наночастиц для микроволновой противораковой терапии .....	101

ШАХМАТОВ В.С., ШАКИРОВ В.А., ЯЦКОВ Я.Р. Анализ структурных изменений углеродных нанотрубок во внешних полях.....	103
ГИМАЛЬДИНОВА М.А., МАСЛОВ М.М., КАТИН К.П. Энергетические и электронные свойства ковалентных цепей на основе кремнийзамещенных CL-20.....	105
МЕРИНОВ В.Б., КУЛЯМИН П.А. Теоретическое исследование структурных и электронных характеристик платиновых нанотрубок .....	107

## СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА И НАНОМЕТРОЛОГИЯ НАНОСИСТЕМ И ГЕТЕРОСТРУКТУР

ХОРОШКО Л.С., БАГЛОВ А.В., КОРОЛИК О.В. Синтез и исследование структуры порошкового перовскита $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}^{2+/3+}$ .....	109
МАЛИН Т.В., МАЙДЕБУРА Я.Е., МАНСУРОВ В.Г., ГАВРИЛОВА Т.А., ГУТАКОВСКИЙ А.К., ВДОВИН В.И., ПОНАМАРЁВ С.А., ЛОШКАРЁВ И.Д., ОСИННЫХ И.В., ВОЛОДИН В.А., МИЛАХИН Д.С., ЖУРАВЛЁВ К.С. Рост свободных от трещин слоёв GaN-on-Si выращиваемых методом $\text{NH}_3$ -МВЕ.....	111
ПАЩЕНКО А.С., ДЕВИЦКИЙ О.В., ЛУНИН Л.С. Структура и дефекты тонких пленок GaInAsBi, выращенных на подложках Si и GaAs.....	113
ЯЦЕНКО А.Н., СЕРЕДИН Б.М., ПОПОВ В.П., ГАВРУС И.В., ЯКОВЕНКО А.А., ЛОГАНЧУК С.М. Двухпозиционное нагревательное устройство для термомиграции жидких зон в пластинах кремния диаметром 100–150 мм .....	115
ДИАНОВ С.В., УЛЬЯНОВ Я.В., ТАРАКАНОВ Е.Д., РУДЫЙ А.В., МАВРЕШКО Е.И. Генерация и разрушение наночастиц вольфрама и их соединений с помощью фемтосекундного лазерного излучения .....	117
ТРОФИМОВ А.А., ДЕНИСОВ И.А., АНДРУСОВ Ю.Б., ГРИШЕЧКИН М.Б., ЦАРЕГОРОДЦЕВ Д.О., КОСЯКОВА А.М., АНТОНОВА В.Е., ГЛАДЫШЕВА К.А., АНДРЕЕВА М.Ю. Современное состояние и перспективы развития HgCdTe для матричных фотоприемных устройств длинноволнового ИК диапазона.....	119
МАЛЫГИН В.А., КОСЯКОВА А.М., ГОНЧАРОВ А.Е., ГЛАДЫШЕВА К.А., КУЛАКОВСКАЯ Т.В., ТОПАКОВ Д.В., ТРОФИМОВ А.А. Анализ полированных пластин Ge для фотоэлектрических преобразователей на основе эпитаксиальных структур GaInP/GaAs/Ge.....	121

ТРОФИМОВ А.А., КОЗЛОВ Р.Ю., КРИВОБОК В.С., УЛЬКАРОВ В.А., МОЛОДЦОВА Е.В., ПАВЛОВ П.В., ПАВЛОВА О.С., КОСЯКОВА А.М., КОМАРОВСКИЙ Н.Ю., НЕСТЮРКИН М.С., КЛЕКОВКИН А.В., МИНАЕВ И.И., ЕРОШЕНКОВ В.В., АТРАШКОВ А.С., КОВИН Я.А.	
Подготовка подложек InSb для МЛЭ .....	123
ГРЕКОВА А.А., КЛИМОВ Е.А., СУХАНОВА А.С.	
Определение температурной зависимости края поглощения эпитаксиальных пленок CdTe in situ эллипсометрическим методом.....	127
КОЛОБКОВА Е.М., ЕЗУБЧЕНКО И.С., ЗАНАВЕСКИН М.Л.	
Эпитаксия релаксированных плёнок GaN на подложках кремния методом аммиачной МЛЭ .....	129
АВЕРЬЯНОВ Д.В., СОКОЛОВ И.С., ТАЛДЕНКОВ А.Н., КОНДРАТЬЕВ О.А., ВИНИЧЕНКО А.Н., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., ПАРФЁНОВ О.Е., ТОКМАЧЁВ А.М., СТОРЧАК В.Г.	
Эпитаксиальная интеграция EuO с GaAs для элементов спинтроники.....	131
АВЕРЬЯНОВ Д.В., СОКОЛОВ И.С., ТАЛДЕНКОВ А.Н., ПАРФЁНОВ О.Е., ЛАРИОНОВ К.В., СОРОКИН П.Б., КОНДРАТЬЕВ О.А., ТОКМАЧЁВ А.М., СТОРЧАК В.Г.	
Инжиниринг слоистого ферромагнитного материала GdAlSi путем графитизации.....	133
КЛОЧКОВ А.Н., ВИНИЧЕНКО А.Н., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., РЫНДЯ С.М., ТРЕТЬЯКОВ Я.С., КАРГИН Н.И.	
Влияние температуры роста и потока мышьяка на структуру эпитаксиальных пленок InAs на подложках сапфира .....	135
НИКОЛАЕВ Д.Д., КЛОЧКОВ А.Н., ВИНИЧЕНКО А.Н., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., КАРГИН Н.И.	
Вторично-ионная масс спектроскопия для анализа многослойных гетероструктур на основе InGaAlAs .....	137
КОЗЛОВ Р.Ю., ТРОФИМОВ А.А., МОЛОДЦОВА Е.В., ПАВЛОВ П.В., ПАВЛОВА О.С., НЕСТЮРКИН М.С., ЩЕНИКОВ Н.В.	
Выращивание монокристаллов InSb диаметром до 100 мм и изготовление полированных пластин на их основе .....	139

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И СЕНСОРОВ

ЕВСЕЙЧИК М.А., ХОРОШКО Л.С., БАГЛОВ А.В., МАМАТКУЛОВ Ш.И., ПЕЧЕРСКАЯ М.Д., ЯКИМЧУК Д.В.	
Фотокаталитически активные наногетероструктуры Ag/TiO <sub>2</sub> /Ti .....	141
БАГЛОВ А.В., ХОРОШКО Л.С.	
Электронная структура поверхности рутила .....	143
ДЫДЫШКО Д.И., БАГЛОВ А.В., ХОРОШКО Л.С.	
Зонная структура перовскитного ортоферрита иттрия с хаббардовским функционалом .....	145

БУДНИК В.С., ТУЧКОВСКИЙ А.К., ФИЛИППОВ В.В., ЛАБУНОВ В.А. Влияние добавки диоксида этилендиаммония на морфологию и светопоглощение металлоорганических перовскитов .....	147
КОВАЛЬЧУК Н.Г., ПРИЩЕПА С.Л. Подвижность носителей заряда в двухслойном твистированном графене легиrowанном азотом .....	149
СОКОЛОВ И.С., АВЕРЬЯНОВ Д.В., ПАРФЁНОВ О.Е., ТАЛДЕНКОВ А.Н., ТОКМАЧЁВ А.М., СТОРЧАК В.Г. Высокая подвижность носителей в двумерной магнитной структуре на основе графена .....	151
СОКОЛОВ И.С., АВЕРЬЯНОВ Д.В., ПАРФЁНОВ О.Е., ТАЛДЕНКОВ А.Н., КОНДРАТЬЕВ О.А., ТОКМАЧЁВ А.М., СТОРЧАК В.Г. Двумерный ферромагнетизм графенизованного GdAlSi .....	153
ФРОЛОВ Н.Ю., КЛОКОВ А.Ю., ШАРКОВ А.И., КУНЦЕВИЧ А.Ю. Акустические свойства слоев и интерфейсов Ван-дер Ваальсовых гетероструктур на основе слоев hBN и MoS <sub>2</sub> .....	155
ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., БУРДЫКИН М.С., НОМОЕВ С.А., ТЕРТЫШНАЯ Ю.А., КЛОЧКОВ А.Н., КАРГИН Н.И. Формирование СКВИД квантовых сенсоров Nb/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Nb с уменьшенной паразитной емкостью .....	157
КАЛОШИН М.М., ВЕРГЕЛЕС С.С., ГУСЕВ А.С., МАРГУШИН Р.Е., САЛКАЗАНОВ А.Т., КАРГИН Н.И., КУКИН Н.С., БУХТИЯРОВ А.А. Получение одиночных NV-центров в CVD алмазе методом облучения высокоэнергетичными электронами .....	159
БОРИСЕНКО Д.П., РЫБИН М.Г., КАТИН К.П., ГУСЕВ А.С. Рост отдельных монокристаллов графена на медном катализаторе методом CVD .....	161
БОРИСЕНКО Д.П., РЫБИН М.Г., КАТИН К.П. Подготовка медного катализатора для роста качественного графена методом CVD в реакторе горизонтального типа .....	163
САЛКАЗАНОВ А.Т., ГУСЕВ А.С., КАЛОШИН М.М., САУРИ А.Д., ЖАРИКОВ А.М., НИЗОВЦЕВ А.П., КИЛИН С.Я., КАРГИН Н.И., РЫЖУК Р.В. ОДМР ансамблей NV-центров в CVD-алмазе с различным содержанием изотопа <sup>13</sup> C .....	165
КУЛЯМИН П.А. Структура и электронные характеристики графена, помещенного на полиэлементные металлические подложки .....	167
КАТИН К.П., БЕРЕЗНИЦКИЙ И.В., МАСЛОВ М.М. Структура и свойства новых аллотропов графена .....	169
БАУЕТДИНОВ Ю.А. Исследование структуры, стабильности и свойств аллотропов, полученных из новых аллотропов графена: компьютерный анализ .....	171

ГРЕКОВА А.А., МАСЛОВ М.М., КАТИН К.П. Электронные и оптические характеристики алмазов с различным типом упаковки.....	173
ЭТРЕКОВА М.О., ЛИТВИНОВ А.В., САМОТАЕВ Н.Н., ПЕВЦОВ И.Д., ОБЛОВ К.Ю., БУХАРОВ Д.Г., ДЕМИДОВ В.М. Повышение быстродействия датчиков водорода для диагностических дыхательных тестов в медицине.....	175
ТОРОПИН А.В., НИКИТЕНКО В.Р. Аналитический подход к разделению первоначально горячих геминальных пар в органических материалах с недиагональным беспорядком.....	177
КОРОЛЕВ Н.А., НИКИТЕНКО В.Р. Электронная подвижность неупорядоченных органических полупроводников: моделирование методом кинетического Монте-Карло .....	179
ЗУБКОВ Л.С., МАСЛОВ М.М., КАТИН К.П. Электронные характеристики двумерного композита на основе перовскита и графена.....	181
ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., НЕКРАСОВ П.В., АЛИМОВ И.Е. Разработка и апробация экспериментального стенда для измерений параметров полупроводниковых устройств в магнитном поле при повышенных температурах.....	183
ФЕДОСЕНКО В.С., ЭМ М., ЯНУШКЕВИЧ В.В., ГОРОХ Г.Г. Интеллектуальные материалы на основе смешанных оксидов для сенсоров и актуаторов .....	185
Именной указатель авторов.....	187

**ГЕТЕРОСТРУКТУРА С ЦИФРОВЫМИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ БАРЬЕРАМИ  
ДЛЯ МАЛОШУМЯЩИХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

*С.А. Богданов, С.Н. Карпов, Р.А. Котекин, \*А.Б. Пащковский*

Научно-производственное предприятие «ИСТОК» имени А.И. Шокина  
Россия, 141190, г. Фрязино, Московская область, ул. Вокзальная, д.2а  
e-mail: [solidstate10@mail.ru](mailto:solidstate10@mail.ru)

**HETEROSTRUCTURE WITH DIGITAL POTENTIAL BARRIERS  
FOR LOW-NOISE FIELD-EFFECT TRANSISTORS**

*S.A. Bogdanov, S.N. Karpov, R.A. Kotekin, \*A.B. Pashkovskii*

Joint-stock company «Research & production corporation «ISTOK» named after A.I. Shokin»  
Russia, 141190 Fryazino, Moscow Region, Vokzalnaya St. 2a, e-mail: [solidstate10@mail.ru](mailto:solidstate10@mail.ru)

The results of a theoretical study of heterostructures for low-noise transistors with donor-acceptor doping and systems of alternating thin layers of AlAs/GaAs forming additional digital potential barriers are presented. The introduction of digital barriers almost completely eliminates the channel of parallel conduction through a wide-band material, significantly increases the drift velocity overshoot of electrons in the region of a strong field.

Характеристики малошумящих транзисторов принципиальным образом зависят от параметров гетероструктуры, важнейшим из которых является подвижность электронов. При субмикронной длине затвора средняя скорость электронов под затвором, определяется её всплеском в области сильного поля  $v_{\max}$ , а максимальный ток ещё и поверхностной плотностью электронов в канале, что вступает в жёсткое противоречие с требованием на максимальную величину  $v_{\max}$ . Поэтому большинство производителей современных малошумящих полевых транзисторов в выборе транзисторных гетероструктур остановились на компромиссном варианте – гетероструктурах с односторонним легированием канала (НЕМТ) и поверхностной плотностью электронов в районе  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Важная их особенность – минимальное рассеяние электронов на легирующей примеси в малошумящем режиме. В свою очередь при открытом затворе рассеяние может быть достаточно существенным, что приводит к увеличению сопротивления истока.

Если рассматривать структуры AlGaAs/GaAs, то существует по крайней мере три крайне эффективных способа локализации электронов в канале:

донорно-акцепторное легирование [1] и введение цифровых барьеров [2], а также комбинация этих способов.

На рис. 1 приведена зонная диаграмма Q-HEMT гетероструктуры, отличающейся от исходной (HEMT) дополнительными цифровыми барьерами и акцепторным легированием со стороны подложки. В предлагаемом варианте конструкции между поверхностью и  $\delta$ -слоем вставлены 4 цифровых барьера AlAs толщиной 3

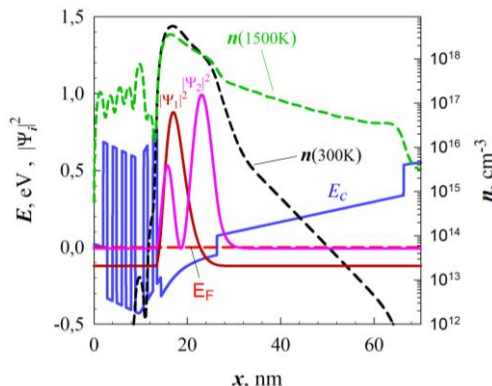


Рис. 1. Зонная диаграмма гетероструктуры с дополнительными цифровыми барьерами и акцепторным легированием со стороны подложки, концентрация и волновые функции электронов. Квадраты волновых функций отложены от высоты соответствующего уровня

барьера AlAs толщиной 3 монослоя каждый. Два таких же барьера вставлены в спейсер между каналом и  $\delta$ -слоем. Край слоя  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$  со стороны подложки легирован акцепторной примесью с поверхностной концентрацией  $0,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Поверхностная плотность электронов в канале равна  $n_s = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

В такой структуре локализация электронов в канале гораздо сильнее чем в традиционной. Так, при температуре электронного газа  $T = 300 \text{ К}$  в широкозонном материале находится менее

0,03 % электронов, а при  $T = 1500 \text{ К}$  менее 3 %. Это приводит к тому, что всплеск дрейфовой скорости электронов, рассчитанный по модели [2], становится близок к  $v_{\text{max}}$  в чистом объемном материале канала даже при малых напряжениях на затворе, что заведомо ведёт к более низким чем в традиционных приборах удельным сопротивлениям истока и стока.

### Литература

1. Пашковский А.Б. А. С. Богданов, В. М. Лукашин, С. И. Новиков. Микроэлектроника 2020, том 49, № 3, с. 210–225.
2. А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, Д.Ю. Протасов, И.А. Рогачёв, Е.В. Терёшкин. Письма в ЖТФ, 2022, том 48, вып. 12, с. 11 – 14.

**СИЛЬНО ЭКРАНИРОВАННЫЕ ДВУМЕРНЫЕ МАГНИТОПЛАЗМОНЫ  
И ВОЛНЫ НА МЕЛКОЙ ВОДЕ В ЛАТЕРАЛЬНО ОГРАНИЧЕННЫХ СИСТЕМАХ**

*\*Д.А. Родионов<sup>1,2</sup>, И.В. Загороднев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Россия, 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7, e-mail: [ire@cplire.ru](mailto:ire@cplire.ru)

<sup>2</sup>МФТИ

Россия, 123456, г. Москва, ул. Керченская, д. 1А, корп. 1, e-mail: [info@mipt.ru](mailto:info@mipt.ru)

**FULLY SCREENED TWO-DIMENSIONAL MAGNETOPLASMONS  
AND SHALLOW WATER WAVES IN LATERALLY BOUNDED SYSTEMS**

*\*D.A. Rodionov<sup>1,2</sup>, I.V. Zagorodnev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Kotelnikov IRE RAS

Russia, 125009 Moscow, Mokhovaya street 11, 7, e-mail: [ire@cplire.ru](mailto:ire@cplire.ru)

<sup>2</sup>MIPT

Russia, 123456 Moscow, Kerchenskaya street 1A, 1, e-mail: [info@mipt.ru](mailto:info@mipt.ru)

In the paper we investigate eigenmodes of plasma oscillations in a two-dimensional electron gas in the form of a rectangle placed in a uniform constant magnetic field and located near a perfectly conductive metal gate. The dynamics of magnetoplasmons in such a system is described by the same equations as the dynamics of waves in shallow water pool under the Coriolis force. This makes it possible to study waves of different nature simultaneously in the same manner. For example, it has been found that in a strong magnetic field (at a high Coriolis frequency), the frequency of the magnetoplasmons (waves in shallow water) tends to zero, which differs from the behavior of this mode in a disk, half-plane or stripe.

Впервые на аналогию между плазменными колебаниями в сильно экранированных двумерных (2D) электронных системах (ЭС) и волнами на мелкой воде было указано в 1993 году [1]. Мы показали, что эта аналогия применима и к латерально-ограниченным системам. При этом размерно-квантованным «объёмным» магнитоплазмонам соответствуют волны Пуанкаре, а краевым магнитоплазмонам – волны Кельвина. Особое внимание будет уделено прямоугольной геометрии в связи с недавним экспериментом [2].

Рассмотрим прямоугольник с двумерным электронным газом. Пусть начало системы координат располагается в углу прямоугольника, а её оси  $x$  и  $y$  направлены вдоль его краев с длинами  $W_x$  и  $W_y$ , соответственно. На расстоянии  $d$  под 2D ЭС находится бесконечный идеально проводящий металлический затвор. Используя уравнение Пуассона, локальный закон Ома



с проводимостью в модели Друде и уравнение непрерывности приходим к уравнению на плотность двумерного тока:

$$(\omega^2 + i\omega\omega_c\hat{R})\mathbf{j}(x, y) = -v^2 \text{grad div } \mathbf{j}(x, y),$$

где  $\omega$  – частота колебаний,  $\omega_c$  – циклотронная частота,  $v^2 = 4\pi d n e^2 / m$  (в СГС) – квадрат скорости плазмона, а  $e$ ,  $m$  и  $n$  – заряд, масса и двумерная концентрация электронов,  $\hat{R}$  – двумерная матрица поворота на угол  $\pi/2$  по часовой стрелке. Для гидродинамических волн ток следует заменить на скорость волны, циклотронную частоту – на удвоенную частоту вращения планеты, помноженную на синус широты расположения водного бассейна (частота Кориолиса), а скорость  $v$  – на корень квадратный из произведения ускорения свободного падения на глубину бассейна. На границе нормальная компонента тока (скорости волны) равна нулю. Отметим, что операторы  $\hat{D}$  и  $i\hat{R}$  являются эрмитовыми. Полученное уравнение решалось численно и аналитически разложением плотности тока по базису, составленному из решений этой задачи в отсутствие магнитного поля. В работе изучены магнитодисперсии, т.е. зависимости частот от магнитного поля, нижайших плазменных мод. Показано, что изучение свойств плазменных колебаний в сильно экранированной латерально ограниченной 2D ЭС одновременно позволяет изучать волны на мелкой воде в бассейне такой же геометрии. Оказалось, что в слабом магнитном поле частоты исходно вырожденных плазменных мод расщепляются линейно по магнитному полю, а невырожденные – квадратично. В сильных магнитных полях частота основной моды, являющейся краевым магнитоплазмон, обратно пропорциональна циклотронной частоте. Такое поведение отличается от результатов в других известных геометриях как диск полоса или полуплоскость, где частота краевого магнитоплазмона принимает ненулевое асимптотическое значение [3, 4].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Родионов Д.А. особенно благодарит Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 21-1-5-133-1).

#### Литература

1. M. Dyakonov and M. Shur, Phys. Rev. Lett. **71**, 2465 (1993).
2. A.M. Zarezin, D. Mylnikov, A.S. Petrov, D. Svintsov, P.A. Gusikhin, I.V. Kukushkin, and V.M. Muravev, Phys. Rev. B **107**, 075414 (2023).
3. I.V. Zagorodnev, A.A. Zabolotnykh, D.A. Rodionov, V.A. Volkov, Nanomaterials **13**, 975 (2023).
4. D.A. Rodionov, I.V. Zagorodnev, JETP Lett. **118**, 100 (2023).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА КВАЗИДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ  
В СЛОЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ИЛИ КВАНТОВЫХ КОЛЕЦ  
ВО ВНЕШНЕМ ПОЛЕ МЕТОДОМ ТРАЕКТОРИЙ**

*\*Ю.Д. Сибирмовский, Е.А. Музыкина*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [YDSibirmovsky@mephi.ru](mailto:YDSibirmovsky@mephi.ru)

**MODELING OF TWO-DIMENSIONAL ELECTRON TRANSPORT  
IN QUANTUM DOT OR QUANTUM RING LAYERS IN EXTERNAL FIELDS  
BY THE METHOD OF TRAJECTORIES**

*\*Yu.D. Sibirmovsky, E.A. Muzykina*

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [YDSibirmovsky@mephi.ru](mailto:YDSibirmovsky@mephi.ru)

This work is concerned with the modeling of two-dimensional electron transport in an array of semiconductor quantum rings or quantum dots. A new algorithm is developed, which allows to efficiently calculate trajectories of multiple electrons, while taking into account quantum interference and external fields. A new way to estimate Bohm quantum potential is proposed.

Полупроводниковые 0D наноструктуры (квантовые точки и квантовые кольца) являются перспективным материалом для устройств наноэлектроники и фотоники. Несмотря на большой объем работ, посвящённых технологии и свойствам данных объектов, до сих пор не было проведено комплексного исследования электронного транспорта в слоях эпитаксиальных КТ/КК, находящихся вблизи или на поверхности квантовой ямы. Такая гибридная система имеет смешанную размерность (между 0D и 2D). Для интерпретации результатов экспериментальных исследований, а также для проектирования устройств на основе указанных структур необходимы надёжные и эффективные методы моделирования электронного транспорта. Для этого необходимо корректно учесть рассеяние на КТ/КК, в том числе квантовые интерференционные эффекты, влияние электрического и магнитного полей, электрон-электронное взаимодействие. В связи со сложностью задачи в данной работе используется метод, основанный на вычислении траекторий электронов, но с учётом квантовых эффектов [1], который обладает рядом преимуществ перед более традиционными методами.

Представляя волновую функцию в полярной форме и подставляя её в уравнение Шредингера, получаем систему из двух уравнений. Первое – уравнение непрерывности для плотности вероятности, второе – уравнение Ньютона с дополнительным квантовым потенциалом (потенциал Боба).

Данные уравнения можно интегрировать как на сетке, так и вдоль траекторий. Второй вариант является более эффективным, однако требует интерполяции координат электронов для вычисления потенциала Бома, который зависит от плотности вероятности. В данной работе плотность вероятности представляется в виде суммы независимых волновых пакетов (функций Гаусса), центрированных на координатах каждого электрона. Это позволяет вычислять потенциал Бома и его градиент аналитически.

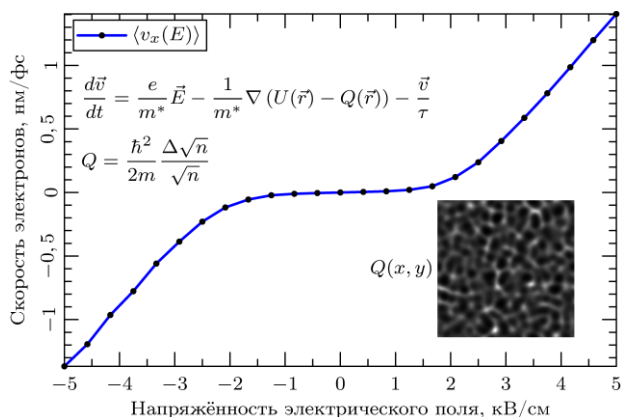


Рис. 1. Результаты моделирования траекторий 2000 электронов в области  $500 \times 500$  нм с ансамблем квантовых точек с периодическими граничными условиями, а также основные уравнения и 2D карта потенциала Бома  $Q$

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания, проект FSWU-2023-0075.

#### Литература

1. Wyatt, Robert E. Quantum dynamics with trajectories: introduction to quantum hydrodynamics, 2005, USA, Springer, 406 p.

**СПЕКТРЫ ФОТОЛУМИНЕСЦЕНЦИИ ОДНОСТОРОННЕ ЛЕГИРОВАННЫХ  
НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaAs/InGaAs  
С РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ**

*\*Л.А. Шербаков<sup>1</sup>, А.Н. Клочков<sup>1</sup>, А.Н. Виниченко<sup>1</sup>, И.С. Васильевский<sup>1</sup>, Н.И. Каргин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, г.Москва, Каширское шоссе, дом 31

e-mail: [levshcherbakov2004@gmail.com](mailto:levshcherbakov2004@gmail.com)

**PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA OF SINGLE-SIDE DOPED AlGaAs/InGaAs  
NANOHETEROSTRUCTURES WITH DIFFERENT ELECTRON CONCENTRATIONS**

*\*L.A. Shcherbakov<sup>1</sup>, A.N. Klochkov<sup>1</sup>, A.N. Vinichenko<sup>1</sup>, I.S. Vasilevskii<sup>1</sup>, N.I. Kargin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»

Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe highway, 31, e-mail: [levshcherbakov2004@gmail.com](mailto:levshcherbakov2004@gmail.com)

The dependence of photoluminescence spectra from AlGaAs/InGaAs/GaAs quantum well with single-sided doping is investigated as a function of sheet electron concentration. The layer structure and thickness of quantum well InGaAs of PHEMT heterostructures is analyzed with HRXRD method. The samples are grouped in three series by their thickness and content of In. In every series concentrations of In in samples are different. Spectra of all nanoheterostructures in these three series are obtained with low-temperature photoluminescence spectroscopy. The dependence of spectra from electron concentration in InGaAs is observed and described with modeling.

Спектроскопия фотолуминесценции широко используется для исследования энергетического спектра и зонного профиля в сложных гетероструктурах. Оптические свойства рНЕМТ гетероструктур зависят от толщины и состава квантовой ямы, встроенных электрических полей, концентрации электронов и количества заполненных энергетических подзон. В данной работе исследовалась зависимость спектров фотолуминесценции от концентрации электронов в квантовых ямах AlGaAs/InGaAs/GaAs с односторонним дельта-легированием.

Методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии проанализированы состав и толщина квантовой ямы InGaAs нескольких десятков рНЕМТ образцов, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии НИЯУ МИФИ. На рис. 1 представлена кривая дифракционного отражения образца 316, измеренная в геометрии  $2\theta - \omega$ . Положение и ширина пика дифракции с максимумом при углах  $2\theta \approx 64^\circ$  позволяет идентифицировать состав и толщину слоя InGaAs.

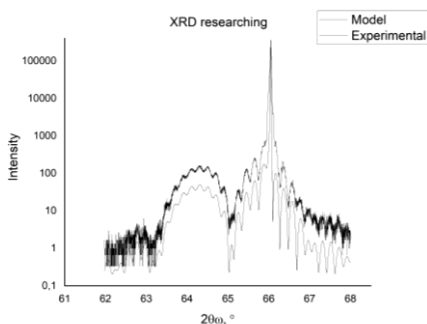


Рис. 1. Теоретическая и экспериментальная зависимость отражения рентгеновских лучей от рНЕМТ гетероструктуры

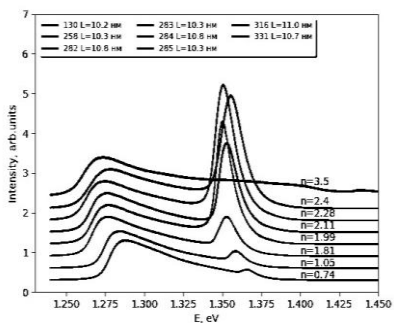


Рис. 2. Спектры ФЛ рНЕМТ структур с  $x = 0.195 \pm 0.05$  при различной концентраций электронов

Из большой совокупности гетероструктур, полученных в НИЯУ МИФИ в разное время были отобраны образцы, обладающие близкой толщиной квантовой ямы и содержанием индия и сгруппированы в три серии с содержанием  $\text{In } x = 0.215 \pm 0.05, 0.205 \pm 0.05$  и  $0.195 \pm 0.05$ . В каждой из серий образцы различаются концентрацией электронов из-за различного слоевого легирования, толщины слейсера и расстояния до поверхности. Такая группировка позволила исследовать зависимость оптических свойств от электронной плотности с исключением влияния структурных факторов (ширины и глубины потенциальной ямы)  $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$  на особенности спектров.

Методом низкотемпературной спектроскопии фотолюминесценции получены спектры излучения наногетероструктур. Спектры фотолюминесценции для серии 3 представлены на рисунке (2). Обнаружено, что при увеличении концентрации электронов в КЯ происходит смещение первых пиков в сторону меньших энергий, увеличивается отношение интенсивностей пиков с участием первой и второй электронной подзоны. С использованием моделирования объясняется данные изменений спектров за счет изменения зонной структуры и встроенного электрического поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение №075-15-2021-1352).

### Литература

1. R.A. Khabibullin et al. *Semiconductors*, **45** (5), 657 (2011).
2. D.K. Bowen, B.K. Tanner *High-resolution X-ray diffraction and topography*, Science (2002).
3. D.A. Safonov et al., *Physica E: Low-Dimensional Systems* **133**, 114787 (2021).

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ  
МОДУЛЯТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ НА РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМАХ**

**\*Е.А. Лаврухина<sup>1</sup>, А.И. Бобров<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>1</sup>, К.В. Сидоренко<sup>1</sup>, Д.В. Хомицкий<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Россия, 603022 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
e-mail: [ekaterina.a.lavrukina@gmail.com](mailto:ekaterina.a.lavrukina@gmail.com)

**THE CURRENT STATE OF INTEGRATED ELECTRO-OPTIC MODULATORS  
OPERATING ON VARIOUS MECHANISMS**

**\*E.A. Lavrukina<sup>1</sup>, A.I. Bobrov<sup>1</sup>, A.V. Nezhdanov<sup>1</sup>, K.V. Sidorenko<sup>1</sup>, D.V. Khomitsky<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
Russia, 603022 Nizhny Novgorod, 23 Gagarin Avenue  
e-mail: [ekaterina.a.lavrukina@gmail.com](mailto:ekaterina.a.lavrukina@gmail.com)

Electro-optic modulators are a key part of photonic integrated circuits that provides an energy efficient way to increase the speed and bandwidth of data transmission networks. This work is devoted to a comparison of modern phase modulators operating on the basis of various electro-optical effects in a system of materials covering LiNbO<sub>3</sub>, III-V semiconductors, Si, Ge. An assessment of the main performance indicators is given: changes in the refractive index, the product of the half wave voltage and the length of phase shift region. Special attention is paid to the review of various electro-optical materials, the most promising for practical use.

Наиболее успешные на сегодняшний день коммерческие модуляторы, выполненные по схеме Маха–Цендера, создаются на основе нелинейно-оптического кристалла ниобата лития (LiNbO<sub>3</sub>). Последний характеризуется сильным эффектом Поккельса, широким окном прозрачности (0.4–55.0 мкм), а также практически неограниченным потенциалом к увеличению быстродействия модуляции [1]. При этом, электрооптическая эффективность модуляции в приборах на основе объёмного LiNbO<sub>3</sub>, определяемая универсальной величиной  $V_{\pi}L_{\pi}$ , составляет более 10 В·см, что делает ниобат лития неконкурентоспособным по этому параметру по сравнению с модуляторами на основе кремния, демонстрирующим эффективность на уровне  $V_{\pi}L_{\pi} = 0.31$  В·см [2]. Соответствующий факт ограничивает использование ниобата лития в компактных фотонных интегральных схемах, в частности, аналоговых фотонных вычислительных устройствах (АФВУ). Несмотря на успехи в области применения тонкоплёночной технологии LiNbO<sub>3</sub>, открывшей новые перспективы, значение величины  $V_{\pi}L_{\pi} < 1$  В·см для указанного материала по-прежнему остаются недостижимыми [3].

Кремний, несомненно, представляется наиболее перспективным материалом для интегральной фотоники. В нём, благодаря электрически контролируемым перераспределениям плотности свободных носителей в конденсаторно-подобных структурах, достигается изменение показателя преломления  $\Delta n \sim 3\%$ , при этом электрооптическая эффективность, как указывалось выше, соответствует значению  $V_{\pi} L_{\pi} = 0.31 \text{ В} \cdot \text{см}$  [2].

Усилить электрооптический эффект в кремнии возможно через гибридную интеграцию в его структуру квантоворазмерных включений по аналогии с тем, как это было сделано в модуляторах на основе полупроводников группы III-V [4, 5]. Особенность последних, состоит в реализации квантоворазмерного эффекта Штарка в туннельно-связанных квантовых ямах. Изменение показателя преломления в указанных структурах рассчитывается с использованием соотношения Крамерса-Кронига [6]. Характеристика  $V_{\pi} L_{\pi}$  для разных конфигураций модуляторов на основе квантовых ям находится в диапазоне от  $0.05 \text{ В} \cdot \text{см}$  [7] до  $0.4 \text{ В} \cdot \text{см}$  [8], где наилучшие результаты достигнуты для InGaAsP/Si.

По этой причине в последнее время фокус исследований смещается в сторону гибридных платформ, демонстрирующих усиление электрооптического эффекта в волноводных структурах за счёт их интеграции с квантоворазмерными объектами на основе полупроводников группы III-V или германия (Ge). Так, например, в работе [9] был успешно продемонстрирован модулятор на основе асимметричных туннельно-связанных квантовых ям Ge/SiGe, характеризующийся высокой эффективностью модуляции, на уровне  $V_{\pi} L_{\pi} = 0.055 \text{ В} \cdot \text{см}$ . Таким образом, на ближайшее десятилетие гибридная интеграция в кремниевой фотонике представляется важнейшей научно-технической задачей.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FSWR-2022-0007.

#### Литература

1. Mercante A.J., et al., Optics express, **26**, 11, 14810-14816 (2018).
2. Li Y. et al., ACS omega, **8**, 10, 9644-9651 (2023).
3. Baba T. et al., Optics Express, **23**, 26, 32950-32960 (2015).
4. Ueda Y. et al., Optical Metro Networks and Short-Haul Systems IX, **10129**, 13-19, SPIE (2017).
5. Бобров А.И. и др., ФТП, **56**, 9, 833 (2022).
6. Nakamura K. et al., IEEE journal of quantum electronics, **28**, 7, 1670-1677 (1992).
7. Han J. H. et al., Nature Photonics, **11**, 8, 486-490 (2017).
8. Hiraki T. et al., Optics Express, **29**, 2, 2431-2441 (2021).
9. Zhang Y. et al., Nanophotonics, **10**, 6, 1765-1773 (2021).

## ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕРМООПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА В КРЕМНИЕВЫХ ФИС

*\*Г.А. Лемешевская<sup>1</sup>, А.П. Горшков<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>1</sup>, А.А. Скрялев<sup>1</sup>, А.И. Бобров<sup>1</sup>,  
К.В. Сидоренко<sup>1</sup>, Д.С. Клементьев<sup>1</sup>, Н.В. Малехонова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Россия, 603022 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, e-mail: [lemeshevskaya@unn.ru](mailto:lemeshevskaya@unn.ru)

## VERIFICATION OF THERMOOPTICAL ELEMENT IN SILICON PIC

*\*G.A. Lemeshevskaya<sup>1</sup>, A.P. Gorshkov<sup>1</sup>, A.V. Nezhdanov<sup>1</sup>, A.A. Skrylev<sup>1</sup>, A.I. Bobrov<sup>1</sup>,  
K.V. Sidorenko<sup>1</sup>, D.S. Klementyev<sup>1</sup>, N.V. Malekhonova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Lobachevsky University  
Russia, 603022 Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23, e-mail: [lemeshevskaya@unn.ru](mailto:lemeshevskaya@unn.ru)

In this work, mathematical modeling of thermo-optical phase-shifting elements was carried out in order to determine their operating voltages in an interferometer according to the Mach-Zehnder scheme, made on the basis of a silicon-on-insulator system. It has been established that radiation modulation is achieved at a voltage not exceeding 5 V. Experimental data confirmed the performance of the modulator as a phase shift modulator in this voltage range.

Одной из актуальных задач в отечественной микроэлектронике является импортозамещение оптоэлектронной компонентной базы. В рамках данной задачи перспективным направлением является создание фотонных интегральных схем на основе подложки «кремний на изоляторе» для последующей реализации фотонных вычислительных устройств [1].

В данной работе было проведено математическое моделирование термооптического элемента в программной среде COMSOL Multiphysics® для определения рабочих значений напряжения необходимого для переключения модулятора при различной длине интерферометра. В основе модели – интерферометр Маха-Цендера. Изменение фазы света осуществляется за счет термооптического эффекта, то есть путем локального изменения температуры в области фазового сдвига.

По результатам моделирования было получено, что достижение переключения в рассмотренных конструкциях модулятора возможно при напряжении, не превышающем 5 В.

На основе проведенного математического моделирования был создан тестовый чип на материально технической базе НИИИС им. Ю.Е. Седакова, содержащий интерферометр Маха-Цендера с термооптическим элементом для проверки работоспособности термооптического модулятора. Чип поме-



щался в измерительную установку, при этом на контакты требуемого термооптического элемента подавалось напряжение с лабораторного блока питания.

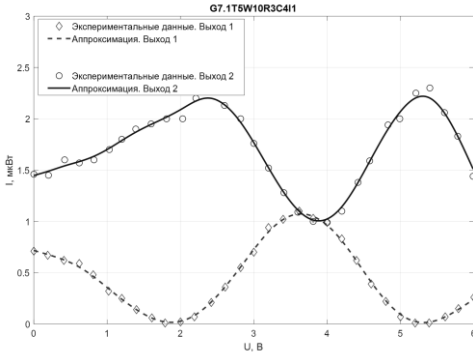


Рис. 1. Интенсивность на выходах интерферометра Маха-Цендера при изменении напряжения на нагревателе

В результате проведенного эксперимента была получена зависимость, представленная на рис. 1. Данная зависимость подтверждает результат математического моделирования о напряжении, необходимом для переключения.

В ходе эксперимента также было получено время нарастания и спада сигнала, которое хорошо согласуется с результатами моделирования. Полученные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение временных характеристик

	Время нарастания сигнала, мкс	Время спада сигнала, мкс
Модель	30	70
Эксперимент	30	50

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод об эффективной работе модулятора и хорошей точности созданной математической модели.

В части математического моделирования работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007. В части эксперимента исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023-2025».

**Литература**

I. R. Baets, B. Kuyken, *Advanced Photonics*, **1**, 030502 (2019).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАБОТЫ КРЕМНИЕВЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ  
ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ**

*\*А.В. Нежданов<sup>1</sup>, К.В. Сидоренко<sup>1</sup>, П.В. Волков<sup>2</sup>, О.С. Вязанкин<sup>2</sup>, А.А. Скрялев<sup>1</sup>,  
А.И. Бобров<sup>1</sup>, А.П. Горшков<sup>1</sup>, Д.С. Клементьев<sup>1</sup>, Н.В. Малехонова<sup>1</sup>, Г.А. Лемешевская<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Россия, 603022 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, e-mail: [nezhdanov@phys.unn.ru](mailto:nezhdanov@phys.unn.ru)

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН  
Россия, 603087, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., ул. Академическая, д. 7

**SIMULATION AND ANALYSIS OF SILICON OPTICAL SIGNAL SPLITTERS  
IN PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS**

*\*A.V. Nezhdanov<sup>1</sup>, K.V. Sidorenko<sup>1</sup>, P.V. Volkov<sup>2</sup>, O.S. Vyazankin<sup>2</sup>, A.A. Skrylev<sup>1</sup>,  
A.I. Bobrov<sup>1</sup>, A.P. Gorshkov<sup>1</sup>, D.S. Klementyev<sup>1</sup>, N.V. Malekhonova<sup>1</sup>, G.A. Lemeshevskaya<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Lobachevsky University  
Russia, 603022 Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23, e-mail: [nezhdanov@phys.unn.ru](mailto:nezhdanov@phys.unn.ru)

<sup>2</sup>Institute of Microstructure Physics RAS  
Russia, 603087, Afonino village, Kstovsky district  
Nizhny Novgorod region, st. Akademicheskaya, 7

In this work, mathematical modeling of a planar optical splitter of an optical signal was carried out in the COMSOL Multiphysics® and Ansys Lumerical software environment to determine the working geometry of the silicon waveguide, Y-splitter and directional coupler (slitless and with a slit width of 350 nm). A study of division coefficients and optical losses was carried out.

Важной задачей отечественной микроэлектронике является импортозамещение оптоэлектронной компонентной базы. В рамках данной задачи перспективным направлением является создание фотонных интегральных схем (ФИС) на основе подложки «кремний на изоляторе» (КНИ) для последующей реализации фотонных вычислительных устройств (ФВУ) [1]. Ключевыми элементами ФИС являются делители оптического сигнала, которые лежат в основе интерферометра Маха-Цендера.

В данной работе было проведено математическое моделирование планарного оптического делителя оптического сигнала в программной среде COMSOL Multiphysics® и Ansys Lumerical, для определения рабочей геометрии кремниевого волновода, Y – делителя и направленного ответвителя (безщелевого и с шириной щели 350 нм). В качестве базовых параметров брались технологические возможности НИИИС им. Ю.Е. Седакова.

На основании результатов моделирования (рис. 1а) были выработаны технические требования, и изготовлены, на базе НИИС им. Ю.Е. Седакова, соответствующие структуру с вариацией параметров геометрии (рис. 1б).

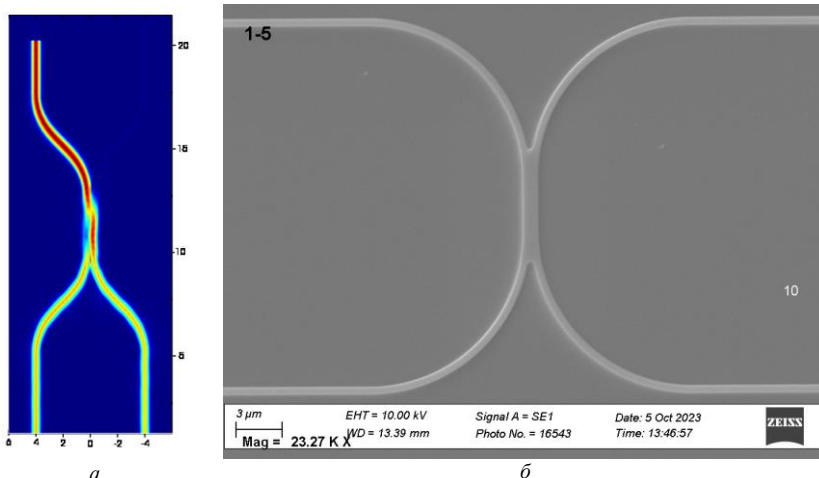


Рис. 1. Направленного ответвитель с делением волнового фронта в пропорции 50:50:  
 а – математическая модель; б – макетный образец

В результате проведенных экспериментов по исследованию оптических потерь было показано, что Y-делители обеспечивают хорошее равномерное деление 50/50, при этом вносимые потери лежат в диапазоне 2–4 дБ. Для случая безщелевого направленного ответвителя потери находятся в диапазоне 2–5 дБ.

В части математического моделирования работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007. В части эксперимента исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023-2025».

#### Литература

1. R. Baets, B. Kuyken, *Advanced Photonics*, **1**, 030502 (2019).

**ШТАРКОВСКИЙ СДВИГ ПОГЛОЩЕНИЯ В INGAAS/GAAS НАПРЯЖЕННЫХ  
ТУННЕЛЬНО-СВЯЗАННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ**

**\*С.В. Хазанова, А.И. Бобров, А.П. Горшков, К.В. Сидоренко,  
Н.В. Малехонова, Н.В. Байдусь, А.С. Панфилов**

<sup>1</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Россия, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
e-mail: [khazanova@phys.unn.ru](mailto:khazanova@phys.unn.ru)

**STARK SHIFT OF ABSORPTION IN INGAAS/GAAS STRAINED TUNNEL-COUPLED  
QUANTUM WELLS**

**\*S.V. Khazanova, A.I. Bobrov, A.P. Gorshkov, K.V. Sidorenko,  
N.V. Malekhonova, N.V. Baidus', A.S. Panfilov**

<sup>1</sup>Lobachevsky University, Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23  
e-mail: [khazanova@phys.unn.ru](mailto:khazanova@phys.unn.ru)

This work is devoted to the theoretical and experimental study of the absorption coefficient in double InGaAs/GaAs tunnel-coupled quantum wells (TCQWs) under the electrical bias. By means the complex methods of characteristic electron energy losses spectroscopy and geometric phase, the actual indium content and elastic deformations in the layers were determined. Taking into account the structural data, the potential profiles of quantum wells were refined, and the quantum size levels and wave envelopes functions were calculated using the Schrödinger equation. The model absorption spectrum obtained taking into account strain arising in heterostructures and the exciton contribution is in good agreement with photocurrent measurements for these structures.

Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию коэффициента поглощения в двойных InGaAs/GaAs туннельно-связанных квантовых ямах (ТСКЯ) при приложении электрического поля. Методами спектроскопии характеристических потерь энергии электронов и геометрической фазы были определены фактическое содержание индия и упругие деформации в слоях. Используя структурные данные были уточнены потенциальные профили квантовых ям, с помощью уравнения Шредингера рассчитаны уровни размерного квантования и огибающие волновых функций. Модельный спектр поглощения, полученный с учетом упругих напряжений, возникающих в гетероструктурах, и экситонного вклада хорошо согласуется с измерениями фототока для данных структур.

Для передачи данных в оптоволоконных телекоммуникационных сетях широко используются модуляторы по схеме интерферометра Маха-Цендера. При этом в качестве активной электрооптической среды могут быть

использованы массивы напряжённых ТСКЯ InGaAs/GaAs, благодаря их высоким частотным характеристикам и миниатюрности конечных приборов [1]. При воздействии электрического поля в данной структуре возникает перераспределение электронной плотности вследствие квантово-размерного эффекта Штарка. Основной задачей при этом является получение заметного изменения показателя преломления в диапазоне длин волн ( $\lambda \sim 1.5$  мкм) при незначительном увеличении коэффициента поглощения среды. Размытие концентрационных профилей вследствие сегрегации состава, а также наличие упругих деформаций в процессе роста приводит к изменению положения уровней размерного квантования и должно быть учтено при расчете оптических спектров. При этом необходимо предварительное моделирование профиля активной среды [2].

Методом МОС-гидридной эпитаксии на установке AIX200RF были изготовлены напряжённые InGaAs/GaAs ТСКЯ в зоне собственной проводимости р-і-п диода. Структура исследована на просвечивающем электронном микроскопе Libra 200FE (Zeiss, Германия). Измерения спектров фототока проводились с помощью монохроматора МДР-3, оснащенного германиевым фотодетектором при  $T = 77$  К, 300 К. Для возбуждения использован лазер непрерывного действия с длиной волны излучения  $\lambda = 0.63$  мкм.

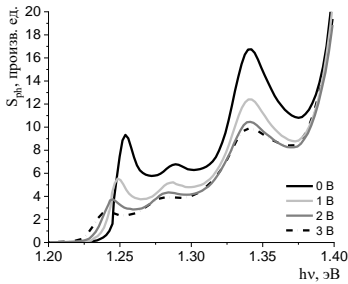


Рис. 1. Спектры фототока, измеренные при  $T = 300$  К

(рис. 1). Показано, что при напряжениях смещения порядка 1,5–2 В экситон разрушается. Далее, учитывая связь между коэффициентом поглощения и мнимой частью диэлектрической проницаемости согласно соотношению Крамерса-Кронига, рассчитана вариация показателя преломления на требуемой для прибора длине волны.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007.

#### Литература

1. Guang Qian et al. // Chinese Optics Letters, V.17(6), 061301 (2019).
2. Yusuke Miyazeki et al // Japanese Journal of Applied Physics. V.58, P. SJJE05 (2019).

**РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В GE/SiGe КВАНТОВЫХ ЯМАХ  
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЯТОРА МАХА-ЦЕНДЕРА**

*\*С.В. Хазанова, А.И. Бобров, А.П. Горшков, К.В. Сидоренко,  
А.В. Нежданов, А.С. Панфилов*

<sup>1</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Россия, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
e-mail: [khazanova@phys.unn.ru](mailto:khazanova@phys.unn.ru)

**NUMERICAL CALCULATION OF REFRACTIVE INDEX IN GE/SiGe QUANTUM  
WELLS FOR DESIGN MACH-ZEHNDER MODULATOR**

*\*S.V. Khazanova, A.I. Bobrov, A.P. Gorshkov, K.V. Sidorenko,  
A.V. Nezhdanov, A.S. Panfilov*

<sup>1</sup>Lobachevsky University, Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23  
e-mail: [khazanova@phys.unn.ru](mailto:khazanova@phys.unn.ru)

In this work, using the Schrödinger equations, a redistribution of electron density in systems with strained Ge/SiGe TCQW was obtained, due to phenomenon of quantum-confined Stark effect. Based on the calculated quantum-size energies and envelope wave functions, the imaginary part of the dielectric constant is obtained as a result of the addition of the interband and exciton contributions. The optical absorption coefficient with in the applied voltage changing has a noticeable “red shift” in the energy range from 0.86 to 0.82 eV.

В данной работе с помощью уравнения Шрёдингера, было получено перераспределение электронной плотности в системах ТСКЯ, обусловленное явлением квантово-размерного эффекта Штарка. На основе рассчитанных энергий размерного квантования и огибающих волновых функций получена мнимая часть диэлектрической проницаемости как результат сложения межзонного и экситонного вкладов. Коэффициент оптического поглощения при изменении приложенного напряжения имеет заметный «красное смещение» в диапазоне энергий от 0.86 до 0.82 эВ.

С бурным развитием оптической связи фотонные интегральные схемы играют все большую роль в информационной индустрии. Кремниевая фотонная интеграция считается отличной платформой для передачи данных благодаря хорошо отработанной комплементарной оксид металл-полупроводник технологии (КМОП). Также она имеет хорошие возможности для обеспечения производительности, цены и объем производства высокоскоростных модуляторов оптических линий связи. Кроме того, в последнее время большой интерес получили и другие материалы группы IV [1]. Фото-

ника на основе Ge может рассматриваться как одна из наиболее перспективных схем для достижения интегральной монолитности активных оптических устройств.

Для соединений центров обработки данных наиболее широко используется архитектура модулятора Маха–Цендера (ММЦ), при этом ММЦ предназначен для модуляции как синфазной, так и квадратурной компоненты сигнала. Принцип этого устройства основан на использовании квантово-размерного эффекта Штарка, путем воздействия электрическим полем на оптические свойства гетероструктур. В настоящее время для реализации для дальней и средне-дальней связи чаще используются полупроводники с прямой запрещенной зоной III–V. Несмотря на то, что Ge является непрямозонным полупроводником, посредством деформации и легирования характер перехода может стать более прямозонным [1]. В [2] продемонстрирована работа волноводного модулятора с асимметричными Ge/SiGe ТСКЯ, который может быть реализован как для модуляции интенсивности, так и фазовой модуляции при низком напряжении смещения в кремниевой фотонной интеграции.

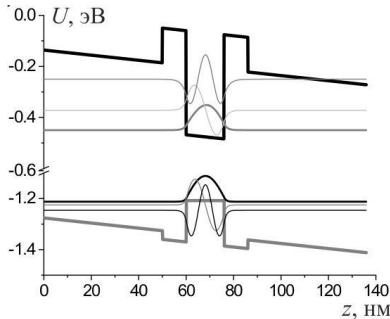


Рис. 1. Зонная диаграмма структуры  $\text{Si}_{0,1}\text{Ge}_{0,9}/\text{Si}_{0,15}\text{Ge}_{0,85}/\text{Ge}$ , рассчитанная при  $T = 300$  К и напряжении смещения 1 В

Эффективная вариация показателя преломления может быть реализована с помощью создания множественных Ge/SiGe или туннельно-связанных квантовых ям (ТСКЯ).

В данной работе, решая уравнения Шредингера получены уровни размерного квантования, огибающие волновых функций, что позволяет смоделировать спектры коэффициентов поглощения и преломления для реального профиля квантовой гетеросистемы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007.

#### Литература

1. K. Guilloy, N. Pauc, A. Gassenq et al., ACS Photonics, v. 3, p. 1907, 2016.
2. Yi Zhang Jianfeng Gao, Senbiao Qin et al., Nanophotonics, 10(6), p. 1765, 2021.

**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ РАДИОФОТОННЫЙ  
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПРИЕМНИК**

**\*В.В. Кулагин<sup>1</sup>, В.В. Валudev<sup>2</sup>, Н.И. Каргин<sup>2</sup>, Р.В. Рыжук<sup>2</sup>, В.А. Черепенин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
МГУ им. М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Университетский просп., 13  
e-mail: [victorvkulagin@yandex.ru](mailto:victorvkulagin@yandex.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

<sup>3</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН  
Россия, 125009, г. Москва, ул. Моховая, 11

**MULTICHANNEL MICROWAVE PHOTONICS ULTRA-WIDEBAND RECEIVER**

**\*V.V. Kulagin<sup>1</sup>, V.V. Valuev<sup>2</sup>, N.I. Kargin<sup>2</sup>, R.V. Ryzhuk<sup>2</sup>, V.A. Cherepenin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University  
Russia, Moscow, Universitetsky Prosp. 13, e-mail: [victorvkulagin@yandex.ru](mailto:victorvkulagin@yandex.ru)

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

<sup>3</sup>Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences  
Russia, Moscow, ul. Mokhovaya, 11

Circuit solutions for microwave photonics systems of signal slicing in the frequency domain into several channels are discussed and the features of the proposed schemes are analyzed. Numerical simulations of the signal conversion in a multichannel microwave photonics receiver with a comb of optical filters were carried out, including subsequent joint computer processing of the outputs of all channels and comparison with the original signal. Dynamic characteristics and recovery errors (in energy) were found, which amounted to 0.02–0.07 %. For modern microwave photonics elements, it is possible to create a channel with a signal-to-noise ratio of up to 50–60 db with a reception band of 1–2 GHz. Thus, when implementing a multichannel ultra-broadband microwave photonics receiving system, about 8–9 effective bits of the input signal can be obtained.

Тенденция развития современных радиочастотных систем – радаров, средств радиоэлектронной борьбы, навигации, беспроводной и спутниковой связи и др. – увеличение полосы пропускания сигнала, что требует разработки соответствующих приемников. Одна из наиболее эффективных технологий – частотное разделение принимаемого сигнала на несколько относительно узкополосных каналов, в каждом из которых могут быть применены традиционные радиоэлектронные элементы. В настоящее время созданы приемники на электронных компонентах, способные реализовать та-



кое разделение, но их характеристики недостаточно высоки, поэтому за последние два десятилетия радиофотонные схемы деления сигнала привлекают все большее и большее внимание.

Обсуждаются схемные решения радиофотонных систем частотного разделения сигнала по каналам и анализируются их особенности, проводится сравнение параметров. Существует два класса таких систем – когерентные и некогерентные. В некогерентных системах применяется прямое фотодетектирование на выходе, что приводит к потере фазовой информации, т.е. такие системы реализуют функцию спектроанализатора. Когерентные системы формируют набор опорных оптических линий для гетеродинирования и сохраняют всю информацию о сигнале. Для всех систем необходимы фильтры, которые выделяют определенную часть спектра оптического сигнала и могут быть реализованы с помощью различных подходов (волоконные брэгговские решетки и резонаторы Фабри-Перо, акустооптические фильтры, микрорезонаторы и др.).

Для многоканального радиофотонного сверхширокополосного приемника, предложенного авторами ранее [1, 2] и базирующегося на делении промодулированного оптического сигнала с помощью линейки фильтров с последующим многоканальным оптическим гетеродинированием, проведены численные моделирования преобразования сигнала, включая и последующую совместную компьютерную обработку выходов всех каналов и сравнение с исходным сигналом для нахождения сквозных характеристик системы. Для трех часто используемых сверхширокополосных сигналов (короткий гауссовский импульс, ЛЧМ и ОФДМ сигналы) найдены динамические характеристики и ошибки восстановления (по энергии), которые составили 0.02–0.07 %.

Показано, что параметры многоканальной радиофотонной приемной системы определяются характеристиками отдельного канала и зависят от параметров лазера, фотодетектора и других элементов. Для современных элементов возможно создание канала с отношением сигнал/шум до 50–60 дБ при полосе приема 1–2 ГГц. Таким образом, при реализации многоканальной широкополосной радиофотонной приемной системы может быть получено порядка 8–9 эффективных бит входного сигнала при эффективной частоте дискретизации, определяемой произведением таковой в каждом канале на число каналов. Работа поддержана программой «Приоритет-2030» (НИЯУ МИФИ).

#### Литература

1. S V.A. Cherepenin et. al., 48th European Microwave Conference (EuMC), Spain, 796 (2018).
2. В.В. Кулагин и др., Известия РАН. Серия физическая **84**, 67 (2020).

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОЙ КООРДИНАТЫ ИСТОЧНИКА СИГНАЛА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОФОТОННОГО ПРИЕМНОГО КАНАЛА**

***Р.В. Рыжук<sup>1</sup>, Д. Буркитбаев<sup>1,2</sup>, В.В. Валув<sup>1</sup>, К.С. Гришаков<sup>1</sup>, Н.И. Каргин<sup>1</sup>, В.В. Кулагин<sup>1,2</sup>***

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: [rvryzhuk@mephi.ru](mailto:rvryzhuk@mephi.ru)

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга  
МГУ им. М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Университетский просп., 13

**DETERMINING THE AZIMUTH OF THE SIGNAL SOURCE USING  
A MICROWAVE PHOTONIC RECEIVING CHANNE**

***R.V. Ryzhuk<sup>1</sup>, D. Burkübaev<sup>1,2</sup>, V.V. Valuev<sup>1</sup>, K.S. Grishakov<sup>1</sup>, N.I. Kargin<sup>1</sup>, V.V. Kulagin<sup>1,2</sup>***

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

<sup>2</sup>Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University

Russia, 119991, Moscow, Universitetsky Prosp. 13

e-mail: [rvryzhuk@mephi.ru](mailto:rvryzhuk@mephi.ru)

To study the possibility for determining the azimuth of the signal source, we measured the amplitude-phase distribution of a horn antenna field. To do this, we measured the output power of a dual parallel electro-optical modulator depending on the phases of the echo signal and an additional reference signal both supplied to the RF inputs of the modulator. The study of the amplitude-phase distribution of the field was carried out at a frequency of 7.5 GHz. The azimuth of the signal source was determined from the integral position of the peak in the Fourier spectrum.

В настоящее время актуальной задачей является обнаружение и идентификация объектов. Для решения этой задачи используются разнообразные методы, позволяющие определять расстояния, скорости, координаты, а также формировать изображения объектов. Параметры радиоголограммы, образованной в плоскости наблюдения при интерференции отраженной от объекта волны и опорной волны, позволяют определить угловые координаты или получить радиоизображение объекта. Эту задачу можно решить с использованием радиофотонных технологий, организовав сложение двух волн в приемном канале [1].

В настоящей работе представлены результаты исследований по определению угловой координаты источника сигнала путем измерения мощности на выходе двойного параллельного электрооптического модулятора. Параметры схемы представлены в работе [2].

Исследование распределения интенсивности поля проводилось на частоте 7,5 ГГц. Было показано, что экспериментально полученные значения

достаточно удовлетворительно описываются выражением для сферической волны:

$$E(r, t) = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr + \varphi_0)},$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны;  $A$  – амплитуда волны;  $r$  – расстояние между источником и приёмником сигнала;  $\omega$  – круговая частота сигнала.

Для определения угловой координаты источник сигнала был ориентирован под углом  $30^\circ$  по отношению к нормали поверхности в центральной точке антенной решетки. Полученный массив данных распределения интенсивности поля был преобразован в Фурье спектр, который был разделен на две части: от начала антенной решетки до ее середины и от середины до противоположного края с целью повышения точности измерений (рис. 1).

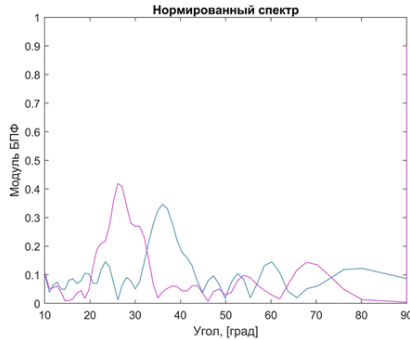


Рис. 1. Фурье спектр от массива данных амплитудно-фазового распределения поля

Угол расположения источника сигнала был определен по интегральному положению пика. Эта величина составила примерно  $30^\circ$ , что соответствовало расположению источника и приемника сигнала.

Работа выполнена в рамках государственного задания (код проекта FSWU-2024-0009).

#### Литература

1. Microwave Photonics Radars. S. Pan, Y. Zhang. J. of lightwave technology. V.38, №19, 2020.
2. Рыжук Р.В. и др. Исследование амплитудно-фазового распределения поля СВЧ излучателя с помощью голографического метода // Мокеровские чтения. Сборник трудов. Москва, 2023. С. 51–53.

**РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТОРЦЕВОГО ВВОДА СВЕТА В ФОТОННЫЕ  
ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЕ InP**

**\*К.С. Гришаков, И.С. Васильевский**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш. 31, e-mail: [ksgrishakov@mephi.ru](mailto:ksgrishakov@mephi.ru)

**CALCULATION AND OPTIMIZATION OF FIBER TO CHIP COUPLER  
FOR InP PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS**

**\*K.S. Grishakov, I.S. Vasil'evskii**

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: [ksgrishakov@mephi.ru](mailto:ksgrishakov@mephi.ru)

Creating fiber to chip coupler for InP photonic integrated circuits with low losses, which can be fabricated using simple technological operations, is one of the important and urgent tasks. In this work, we calculate and optimize one of the possible variants of such a design, based on the use of a three-dimensional adiabatic lateral mode converter with two vertically separated waveguides. This design of the fiber to chip coupler ensures low losses ( $< 2$  dB), and also does not require the use of epitaxial regrowth or special growth and etching techniques required to change the thickness of taper along the vertical direction.

В фотонную интегральную схему световой сигнал вводится через одномодовое оптоволокно, которое за счет малой разницы в показателях преломления сердцевины и оболочки обычно имеет слабонаправленную оптическую моду с диаметром порядка 8–10 мкм. В случае линзированного оптоволокна диаметр моды находится вблизи 4 мкм. Типичная же форма моды волновода фотонной интегральной схемы (ФИС) на технологической платформе InP является эллиптической, а диаметр такой моды значительно меньше минимального размера моды коммерчески доступных оптоволокон. Если в латеральном направлении за счет использования технологии адиабатического расширения планарного волновода ФИС можно достичь увеличения размера моды, то в вертикальном направлении размер моды ограничен слоевой структурой активной области, которая определяется, например, необходимостью достижения эффективной модуляции сигнала. Простые конструкции тейперов, включающие стандартное адиабатическое изменение ширины волновода обеспечивают потери на связь порядка 7 дБ [1].

Из анализа литературных данных [2–4] видно, что наиболее эффективные решения, обеспечивающие низкие потери на ввод излучения из оптоволокна в фотонные интегральные схемы на технологической платформе InP,

зачастую требуют применения сложных технологических операций, таких как наклонное травление и эпитаксиальное дорастивание.

Создание конструкции ввода излучения в фотонные интегральные схемы на технологической платформе InP с низкими потерями, которая при этом может быть изготовлена с применением простых технологических операций, является одной из важных и актуальных задач. В данной работе проводится расчет и оптимизация одного из возможных вариантов такой конструкции, основанного на использовании трехмерного адиабатического латерального конвертора моды с двумя вертикально разделенными волноводами. Свет из оптоволокна вводится в пассивный нижний волновод, который образован несколькими тонкими волноведущими слоями. Расчёты мод, возникающих в пассивном волноводе в зависимости от его ширины и состава слоев, проводятся с помощью численного решения уравнений Максвелла методом конечных разностей. Конструкция преобразователя размера моды является трехмерной, поэтому для расчетов перетекания моды из пассивного волновода в активный используется упрощенный подход, основанный на разложении по собственным модам (eigenmode expansion method) [5].

Оптимизированная конструкция узла ввода света в фотонные интегральные схемы на технологической платформе InP обеспечивает низкие потери (<2 дБ), а также может быть получена с использованием стандартных технологических операций, не требующих применения технологий эпитаксиального дорастивания и наклонного травления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06309.

#### **Литература**

1. N. Shaw, P. J. Williams, J. Buus, *Electron. Lett.* **31** (14), 1143 (1995).
2. I. Moerman, P.P.V. Daele, P.M. Demeester, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **3** (6), 1308 (1997).
3. F.M. Soares, M. Baier, T. Gaertner, N. Grote, M. Moehrle, T. Beckerwerth, P. Runge, M. Schell, *Applied Sciences* **9** (8), 1588 (2019).
4. Y. Ueda, Y. Ogiso, N. Kashio, Y. Hashizume, N. Kikuchi, M. Ishikawa, M. Kohtoku, *Electronics Letters* **53** (12), 797 (2017).
5. G.V. Eleftheriades, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **42** (10), 1896 (1994).

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРОВОДЯЩЕЙ  
ТЕРАГЕРЦОВОЙ АНТЕННЫ С ПЛАЗМОННЫМИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ  
НАНОАНТЕННАМИ И НАНОСТЕРЖНЯМИ**

*\*С.А. Номоев<sup>1</sup>, И.С. Васильевский<sup>1</sup>, А.Н. Виниченко<sup>1</sup>, А.Н. Ключков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Каширское шоссе, д.31, г. Москва  
e-mail: [serganom@gmail.com](mailto:serganom@gmail.com)

**SPECTRAL PROPERTIES OF PHOTOCONDUCTIVE TERAHERTZ ANTENNAS  
FEATURING PLASMONIC RECTANGULAR NANOANTENNAS AND NANORODS**

*\*S.A. Nomoev<sup>1</sup>, I.S. Vasil'evskii<sup>1</sup>, A.N. Vinichenko<sup>1</sup>, A.N. Klochkov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Kashirskoe highway 31, Moscow, 115409  
e-mail: [serganom@gmail.com](mailto:serganom@gmail.com)

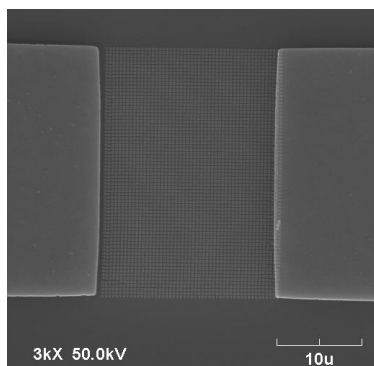
Recent advances have demonstrated improvements in the conversion efficiency of optical radiation into terahertz radiation using photoconductive antennas (PCA) equipped with plasmonic nanoantennas situated within the gaps of ohmic contacts. Notable developments include the fabrication of PCAs using low-temperature gallium arsenide (LT-GaAs) featuring a gold plasmon grating made of nanorods or rectangular nanoantennas. These antennas were produced through molecular beam epitaxy and electron beam nanolithography. The LT-GaAs utilized was annealed at a high temperature of 670 °C, resulting in a significant increase in the efficiency of converting light to terahertz radiation via plasmonic nanostructures [1].

Plasmonic structures enhance light absorption and primarily generate photo-carriers on the surface of LT-GaAs. This process minimizes the distance that surface charge carriers have to travel to the antenna contacts, thereby decreasing the likelihood of recombination. These technological enhancements have therefore expanded the dynamic range of terahertz emissions by incorporating optical nanostructures within the electrode gaps of the PCA. Optical nanoantennas amplify light concentration around arrays of gold nanorods through localized surface plasmon resonance, improving photo-carrier generation and thus augmenting terahertz radiation output.

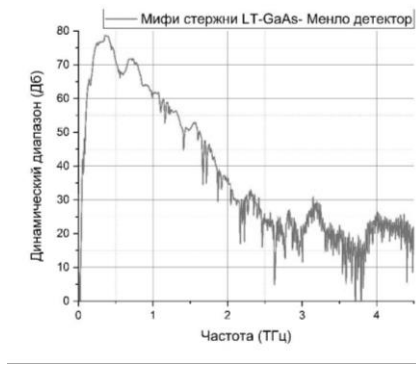
Источники и детекторы терагерцового излучения становятся ключевыми элементами в разнообразных областях, таких как высокоскоростная беспроводная связь, медицинская диагностика, неразрушающий контроль

качества материалов и дистанционное обнаружение опасных веществ. Разработка и изучение таких устройств представляет собой новую и многообещающую область современной электроники [1].

Были выполнены измерения спектральных характеристик фотопроводящей антенны (ФПА) на основе низкотемпературного арсенида галлия, оснащенной плазмонными наноструктурами и наностержнями. Данное устройство показано на схеме (рис. 1). Как видно из рисунка, предложенная терагерцовая ФПА состоит из двух металлических электродов, установленных на подложке из LT-GaAs и разделенных зазором в 21 микрометр, в который встроены наностержни для улучшения поглощения света и усиления генерации терагерцовых волн.



*a*



*б*

Рис. 1. *a*) Изображения, полученные в электронном микроскопе плазмонных наноструктур после нанесения титана с золотом; *б*) частотная зависимость динамического диапазона для ТГц ФПА с наностержнями. Уровень 0 дБ соответствует уровню шума, измеренному с помощью непрозрачного барьера, установленного между генератором и детектором. Напряжение смещения составляет 27,5 В, мощность лазера накачки – 11 мВт для обоих ТГц ФПА

### Литература

1. S. Nomoev, et al., Technical Physics Letters, **44**, 44–46 (2018).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ СВОЙСТВ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КОМПОЗИТНОЙ  
КЕРАМИКИ Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ**

**\*Я.В. Ульянов<sup>1,2</sup>, Е.А. Чешев<sup>1</sup>, А.В. Рудый<sup>1</sup>, Е.И. Маврешко<sup>1</sup>, С.В. Дианов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

<sup>2</sup>Государственный лазерный полигон «Радуга»  
Россия, 600910, г. Радужный, а/я 771, e-mail: [raduga@trassa.org](mailto:raduga@trassa.org)

**INVESTIGATION INTO THE LASING PROPERTIES OF DOMESTICALLY PRODUCED  
Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG COMPOSITE CERAMICS FOR PULSED LASERS**

**\*Ya. V. Ulyanov<sup>1,2</sup>, E. A. Cheshev<sup>1</sup>, A. V. Rudy<sup>1</sup>, E. I. Mavreshko<sup>1</sup>, S. V. Dianov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>National research nuclear university «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe Highway 31, e-mail: [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

<sup>2</sup>State laser polygon «Raduga»  
Russia, 600910 Raduzhnyi, p.o. box771, e-mail: [raduga@trassa.org](mailto:raduga@trassa.org)

The purpose of this work was to study the characteristics of chip elements based on domestic Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG composite ceramics for compact pulsed lasers with diode pumping. Samples of laser ceramics Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG were carried out with them to study the lasing characteristics, as well as with a single crystal for comparison. The relative efficiency of lasers on ceramic microchips remained comparable to crystalline ones, which allows suggest that design optimization is critical to creating efficient ceramic-based microresonators.

Миниатюризация лазерной технологии и разработка компактных резонаторов представляют собой значительный прогресс в этой области. С развитием керамической технологии теперь стали доступны оптические компоненты различных форм и составов, объединяющие активные среды, пассивные элементы и резонаторы. Однако важно выяснить, обладают ли эти керамические компоненты характеристиками генерации, сравнимыми с кристаллами. Целью работы было исследование характеристик чип-элементов на основе отечественной композитной керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG для компактных импульсных лазеров с диодной накачкой.

Образцы разных размеров, с маркировкой С1 и С2, были изготовлены на технологической линии ФКП «ГЛП «Радуга» по производству лазерной керамики [1-2]. Образец С2 был дополнительно переработан в девять элементов различных размеров. После тщательной обработки и полировки на образцы было нанесено соответствующее покрытие. Сторона Nd<sup>3+</sup>:YAG получила слепое покрытие на длину волны генерации 1064 нм и прозрачное покрытие на длину волны накачки 808 нм, а сторона Cr<sup>4+</sup>:YAG была покрыта



выходными зеркалами, адаптированными для достижения оптимальных коэффициентов отражения в соответствии с исходными.

Характеристики генерации измерялись на лабораторном стенде, показанном на рис. 1.

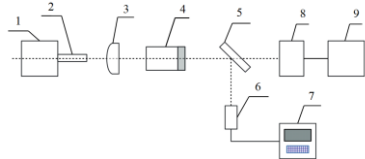


Рис. 1. Схема стенда. 1, 2 – лазерный диод с волоконным выходом или без него, 3 – фокусирующая оптика, 4 – микроchip резонатор, 5 – дихроичное зеркало 50-процентное, 6 – фотоприёмник, 7 – осциллограф, 8, 9 – измеритель мощности

Результаты измерений, представленные в табл. 1, сравнивали два различных керамических образца и монокристалл при различных распределениях профилей накачки. Для образцов, полученных из керамического образца С2, были приведены обобщенные характеристики, как у образцов CS2.3.1-2.4.5 имели идентичные свойства.

Таблица 1

**Генерационные характеристики**

Образец	T0,%	Rout,%	Wp, мкм	<Epulse>, мкДж	τ, нс	f, Гц	Eg/Ep, %
CS1	40	50	231	204	0,9	7692	9
CS2.X	50	60		107	1,2	8458	8,5
CS1	40	50	421	240	1,12	7575	8,1
CS2.X	50	60		121	1,17	7555	4,8
CS1	40	50	152	76	0,852	7964	7,6
CS2.X	50	60		83	1,25	7268	6,4
MC2	36	40		161	0,38	7362	7

В работе изучены генерационные характеристики лазеров на основе композитной керамики в сравнении с кристаллическим образцом, полученным методом диффузионной сварки. Результаты показали, что керамические лазеры имеют несколько худшие характеристики генерации, что потенциально может быть связано с особенностями работы керамических компонентов  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ . Несмотря на это, относительная эффективность лазеров на керамике оставалась сопоставимой с кристаллическими, что позволяет предположить, что оптимизация конструкции имеет решающее значение для создания эффективных микрорезонаторов.

**Литература**

1. S.G. Kazantsev, Issues of electromechanics. Proceedings of VNIEM **163**, 29–47 (2018).
2. V.V. Bezotosny et al., Quantum Electronics **48**, 802-806 (2018).

## СИНТЕЗ ФОТОННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

\**N.V. Siglovaya, N.I. Kargin, S.M. Ryndya, A.O. Sultanov, S.S. Deyneko*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [Nvsiglovaya@mephi.ru](mailto:Nvsiglovaya@mephi.ru)

## SYNTHESIS OF PHOTONIC STRUCTURES BASED ON SILICON DIOXIDE

\**N.V. Siglovaya, N.I. Kargin, S.M. Ryndya, A.O. Sultanov, S.S. Deyneko*

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: [Nvsiglovaya@mephi.ru](mailto:Nvsiglovaya@mephi.ru)

Photonic crystals are materials that have periodic optical properties that allow them to control and manipulate the flow of light. In this work, the synthesis of silicon dioxide microspheres by the *Stöber–Fink–Bohn* method in the form of periodic photonic structures is considered. The size of the particles, the order of their arrangement and defectiveness, as well as optical measurement data were analyzed.

В настоящее время большинство исследований сосредоточено на двумерных фотонных кристаллах (ФК), тем не менее, растет интерес к трехмерным структурам, обеспечивающим контроль над распространением света во всех трех измерениях. Важнейшим материалом для ФК является диоксид кремния в виде микросфер близкого размера, формирующихся в коллоидном растворе и осаждающихся на подложку в результате процесса самоупорядочения под действием силы тяжести [1].

Одним из общепринятых методов формирования частиц-микросфер диоксида кремния является гидролиз тетраэтоксисилана (ТЭОС) в водной среде с присутствием аммиака в качестве катализатора – метод Штобера-Финка-Бона (*Stöber–Fink–Bohn method*) [2].

В эксперименте проводился синтез ФК при мольном соотношении реагентов:  $\text{NH}_3:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}:\text{ТЭОС} = 1:10.85:20.15:0.138$ . Синтезированные микросферы оседали на стеклянные подложки в течение 2–3-х недель и формировали трехмерный ФК. Размеры образующихся микросфер зависят от соотношения компонентов реакционной смеси. Экспериментально были получены ФК со средним диаметром частиц  $240\pm 40$  нм согласно данным растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Анализ РЭМ изображений показал, что полученные пленочные образцы ФК состояли из высокоупорядоченных доменов, со средним размером до  $100 \text{ мкм}^2$  (рис. 1а). В поверхностном слое образцов присутствовали вакансии с концентрацией порядка  $2 \text{ мкм}^{-2}$ .

Оптические измерения, проведенные с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-2600 ряда образцов при нормальном падении света, выявили наличие минимумов отражения в видимом диапазоне: фотонных стоп-зон, обусловленных брэгговской дифракцией на семействе плоскостей (111), рис. 1б. Относительная ширина стоп-зоны составила 0,08, что согласуется с величиной 0,063, рассчитанной для дифракции на плоскостях (111) ГЦК решетки опала.

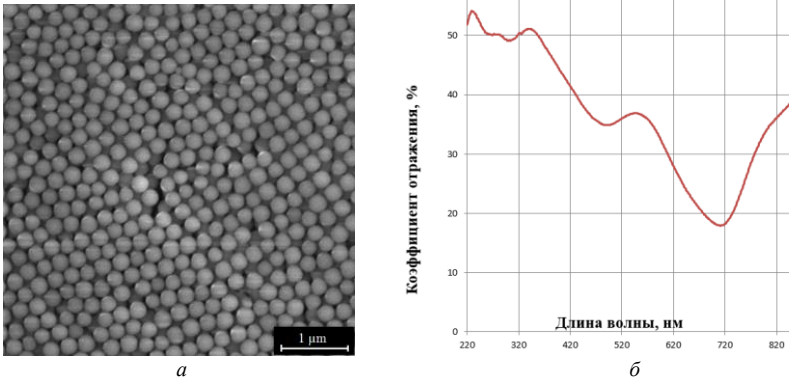


Рис. 1. РЭМ-изображение поверхности пленочного ФК (а); зависимость отражения от длины волны падающего излучения (б)

Работа выполнена с применением оборудования центра коллективного пользования «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников» Национального исследовательского ядерного университета МИФИ.

#### Литература

1. A. Firouzjaei [et al.]. Recent advances and trends in photonic crystal technology. – 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1002455>.
2. W. Stöber, A. Fink, E. Bohn. Journal of Colloid and Interface Science. – 1968, – Vol. 26, – Is. 1, – pp. 62–69.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРИТОННЫХ ЛАЗЕРОВ

*\*Д.В. Лукьяненко, С.М. Рындя*

Национальный исследовательский институт «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [lukianenko\\_dmitry@mail.ru](mailto:lukianenko_dmitry@mail.ru)

## COMPUTER MODELING OF POLARITON LASERS

*\*D.V. Lukianenko, S.M. Ryndya*

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [lukianenko\\_dmitry@mail.ru](mailto:lukianenko_dmitry@mail.ru)

The paper considers one of the directions of solid-state, micro- and nano-electronics, namely the creation of semiconductor heterostructures. A model of polariton laser, a coherent light emitter based on the Bose-Einstein condensate of light-material quasiparticles, i. e. exciton-polaritons, has been constructed. On the example of the scheme of the programmable polariton simulator, features of modeling of semiconductor and polariton lasers in the software environment COMSOL Multiphysics have been investigated. Of scientific interest is computer modeling by optical method on the polariton platform of continuous transition from the antiferromagnetic phase to the ferromagnetic phase and then to the phase with the pair magnetization.

В работе рассматривается одно из направлений твердотельной, микро- и нано-электроники – создание полупроводниковых гетероструктур, то есть структур, изготовленных из двух или более полупроводниковых веществ (материалов), в которых важную роль играет граница раздела этих материалов, их переходный слой.

Строится модель поляритонного лазера – излучателя когерентного света, основанного на Бозе–Эйнштейновском конденсате свето-материальных квазичастиц: экситонных поляритонов [1]. Бозонные конденсаты экситонных поляритонов обладают рядом уникальных физических свойств, благодаря которым физика поляритонных лазеров богата яркими экспериментально наблюдаемыми эффектами [2].

На примере схемы программируемого поляритонного симулятора [3] освоены и исследованы особенности моделирования полупроводниковых и поляритонных лазеров в программной среде COMSOL Multiphysics. В разработанную систему положен принцип, основанный на использовании слабых лазерных пучков, модифицирующих потенциальный ландшафт для поляритонов. Схема прецизионного контроля относительных фаз бозе-конденсатов позволяет исследовать различные спиновые состояния в физике

твёрдого тела и моделировать процессы в универсальных спиновых моделях с хорошо определенными условиями задачи.

Научный интерес представляет компьютерное моделирование оптическим методом на поляритонной платформе непрерывного перехода из антиферромагнитной фазы в ферромагнитную, а затем в фазу с парной намагниченностью.

#### **Литература**

1. A.V. Kavokin, T.C.H. Liew, S. Klembt, C. Schneider, P. Lagoudakis and S. Hoefling, Polaritonics for classical and quantum computing // *Nature Reviews Physics* **4** (2022).
2. J. Kasprzak, R. Andre, L.S. Dang, I.A. Shelykh, A.V. Kavokin, Y.G. Rubo, K.V. Kavokin, G. Malpuech, Build up and pinning of linear polarization in the Bose condensates of exciton polaritons. *Phys. Rev. B.* **75**, 45326 (2007).
3. Патент № 2745206 С1 Российская Федерация, МПК G02F 1/35. Программируемый поляритонный симулятор: № 2020129915: заявл. 10.09.2020: опубл. 22.03.2021 / Л. Павлос, Ю.А. Сергей, А. Алексис; заявитель Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий». – EDN RTRRWX.

**ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМА НА ОСНОВЕ ФАНО РЕЗОНАНСА  
В ЗАМЕРЗАЮЩЕЙ КАПЛЕ ВОДЫ**

**\*И.В. Минин<sup>1,2</sup>, О.В. Минин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Филиала Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», Новосибирск  
e-mail: [prof.minin@gmail.com](mailto:prof.minin@gmail.com)

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
Россия, 630108, г. Новосибирск, Плеханового, дом 10, e-mail: [profolegm@gmail.com](mailto:profolegm@gmail.com)

**ELECTROMAGNETIC NOISE GENERATOR BASED  
ON FANO RESONANCE INSIDE OF A FREEZING WATER DROPLET**

**\*I.V. Minin<sup>1,2</sup>, O.V. Minin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Novosibirsk Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SBRAS  
«Technological Design Institute of Applied microelectronics», Novosibirsk, Russia  
e-mail: [prof.minin@gmail.com](mailto:prof.minin@gmail.com)

<sup>2</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies  
Russia, 630108 Novosibirsk, Plahotnogo av. 10, e-mail: [profolegm@gmail.com](mailto:profolegm@gmail.com)

Fano resonance associated with internal Mie modes can be observed at a certain stage of freezing from the outside to the inside of a spherical micro-droplet of water. A collection of such particles, when frozen, will randomly generate strong electromagnetic fields depending on the size of the drop and the time of its freezing. Such a cloud of freezing drops can be considered as a natural generator of electromagnetic noise.

Резонанс Фано, связанный с внутренними модами Ми, можно наблюдать на определенной стадии замерзания снаружи внутрь сферической микрокапли воды. Совокупность таких частиц при замерзании будут случайным образом генерировать сильные электромагнитные поля в зависимости от размера капли и времени ее замерзания. Такое облако замерзающих капель можно рассматривать как природный генератор электромагнитного шума.

Замерзающая капля воды, состоящая из комбинации воды (ядро) и ледяной оболочки, открывает новые возможности в фотонике. Фазовый переход, связанный с превращением тумана в лёд, играет важную роль в физике атмосферы земли [1]. Однако исследованиям оптических явлений в замерзающей капле воды до сих пор было посвящено всего несколько работ. Некоторые нерезонансные оптические эффекты, возникающие в замерзающей мезомасштабной капле воды, недавно были рассмотрены в [2].

При замерзании капли воды на некоторой стадии замерзания всегда найдется оптимальная толщина поверхностного слоя льда, когда вследствие

интерференции моды высокого порядка с модами низкого порядка, внутри капли образуется резонанс Фано [3–4]. Наши теоретические расчеты предсказали зависящее от времени образование резонансов Фано высокого порядка при замерзании капли воды снаружи внутрь (рис. 1–2). Такой резонанс приводит к значительному увеличению электрических и магнитных полей в горячих точках на полюсах капли. В результате, капля испускает сильный магнитный и электрический импульс – такие частицы работают как генератор рассеянного света.

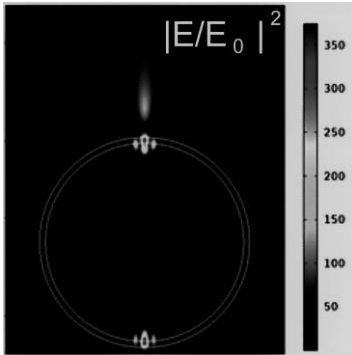


Рис. 1. Интенсивность электрического поля в резонансе Фано

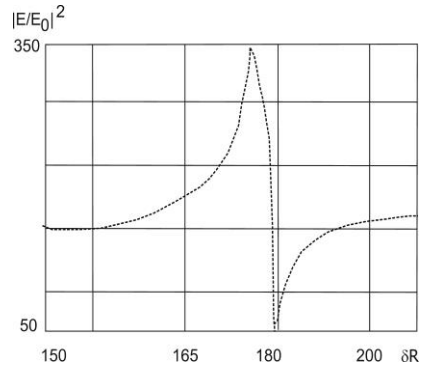


Рис. 2. Распределение интенсивности электрического поля в области резонанса от толщины ледяной оболочки

### Литература

1. L. Galette L., et al. *Meteorological Monographs* **58**, 1–24 (2017).
2. O.V. Minin, I.V. Minin, Y. Cao Y. *Scientific Reports* **13**, 7732 (2023).
3. O.V. Minin, I.V. Minin, S. Zhou. *JETP Letters* **116**(3), 146 (2022).
4. O.V. Minin, S. Zhou, I.V. Minin. *Annalen der physic*, **535**, 2300337 (2023).

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И МЕТОДЫ ИНТЕГРАЦИИ МАТЛАВ-ФУНКЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ PSK МОДЕМОВ НА БАЗЕ ПЛИС ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ**

*\*И.А. Петрошенко<sup>1</sup>, Е.Е. Цуканова<sup>1</sup>, А.А. Сычев<sup>1</sup>, В.А. Клоков<sup>1</sup>, Н.И. Каргин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: [pia016@mephi.ru](mailto:pia016@mephi.ru)

**FEATURES OF APPLICATION AND METHODS FOR INTEGRATING MATLAB FUNCTIONS IN THE DESIGN OF FPGA-BASED PSK MODEMS FOR COMMUNICATION SYSTEMS**

*\*I.A. Petroshenko<sup>1</sup>, E.E. Tsukanova<sup>1</sup>, A.A. Sichev<sup>1</sup>, V.A. Klokov<sup>1</sup>, N.I. Kargin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [pia016@mephi.ru](mailto:pia016@mephi.ru)

A BPSK modem was developed using a Field Programmable Gate Array (FPGA) using MATLAB Simulink tools. This design environment allows you to implement an effective and optimal way to develop digital signal processing blocks.

В современном мире, где скорость и эффективность играют ключевую роль в разработке телекоммуникационных устройств, использование программно-логических интегральных схем (ПЛИС) в устройствах связи становится все более актуальным. Однако процесс реализации алгоритмов на ПЛИС может быть сложным и требовать значительных ресурсов в связи с постоянным увеличением запросов потребителей. Среда разработки MATLAB/Simulink является одним из удобных и эффективных инструментов для проектирования различных алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Был реализован BPSK-модем, передающий псевдослучайную последовательность, сгенерированную блоком LFSR.

Данный модем был спроектирован в среде MATLAB/Simulink. Все входы и выходы данного блока, а также промежуточные переменные должны иметь тип данных `fixedpoint`. [1] Часть элементов в устройстве были сделаны с использованием блоков «MATLAB Function».

Особенность написания – переменные, которые в теле функции принимают значения некоторых чисел, необходимо предварительно инициализировать. Для этого вводится ключевое слово «persistent».

Кроме того, нумерация в MATLAB начинается с 1, тогда как в HDL-языках с 0. Поэтому индекс в цикле следует инициализировать как 0, однако при обращении к ячейке массива использовать индекс +1. На основе этих правил был написан блок приемопередатчика.



Написанный блок коррелятора, находящегося в приемной части, работал некорректно в ПЛИС, в то время как в модели алгоритм работал правильно. Причиной этого стало ошибочно сгенерированный HDL-код. Исходя из этого, было принято решение декомпонировать написанные MATLAB-функции и использовать библиотечные компоненты Simulink (примитивы). В результате процесс реализации блока ускорился, и проблем с работой HDL-кода не возникло.

После этого из MATLAB-функций и примитивов были созданы тестовые блоки, проверяющие работоспособность приемника и передатчика. Результаты были занесены в раздел Workspace с помощью блока «To workspace». Далее с использованием filWizard был получен проект и файл прошивки ПЛИС.

Разработка в MATLAB выигрывает своей универсальностью: поскольку новое семейство ПЛИС вводится примерно каждые 12–18 месяцев, а цикл проектирования крупных SDR-систем может составлять значительную часть этого периода, последствия переносимости кода (или, точнее, непереносимости) очевидны. [2]

В результате был разработан алгоритм проектирования цифровых устройств на базе ПЛИС с использованием MATLAB/Simulink:

- Проведен обзор методов интеграции MATLAB-функции при проектировании устройств на ПЛИС;
- Была выработана методика написания блоков MATLAB-функций для проектирования алгоритмов различных устройств в MATLAB/Simulink;
- На основе данной модели был сгенерирован HDL-код, который был проверен на плате Xilinx KC705 (xc7k325t). После тестирования и отладки алгоритм работы совпал с моделью работы Simulink.

#### **Литература**

1. MATLAB Documentation. (2023). «Simulink HDL Coder User's Guide». MathWorks.
2. Ain M.F., Naghmash M.S., Chye Y.H. Synthesis of HDL code for FPGA design using system generator //European Journal of Scientific Research. – 2010. – Т. 45. – №. 1. – С. 111–121.
3. Wang, Q., & Chen, L. (2021). «Integration of HDL Code for Cellular Modems on FPGA using MATLAB Simulink». IEEE Transactions on Wireless Communications, 40(3), 215–228.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЙ АШАs**

*\*Д. Цунваза, Р.В. Рыжук, Т.Н. Неволлина, И.С. Васильевский, В.А. Клоков, Н.И. Каргин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: [tsdamir321@gmail.com](mailto:tsdamir321@gmail.com)

**THE INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE CHARACTERISTICS  
OF PASSIVE COMPONENTS BASED ON АШАs HETEROSTRUCTURE COMPOUNDS**

*\*D. Tsunvaza, R.V. Ryzhuk, T.N. Nevolina, I.S. Vasil'evskii, V.A. Klokov, N.I. Kargin*

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: [tsdamir321@gmail.com](mailto:tsdamir321@gmail.com)

The work is devoted to studying the behavior of MIM capacitors on GaAs substrate operated in various temperature regimes. The measurements were made using Agilent PNA-X vector network analyzer and MPI TS200-IFE probe station in the temperature range from 25 °C to 125 °C and frequency range up to 50 GHz. The software of modern ECADs is used for circuit simulations. The obtained result shows the increase of the capacitance at high temperatures by more than 15 per cent in the frequency range 10–20 GHz and can be used to improve the quality of models in element libraries that are using for the design of monolithic integrated circuits.

Для эффективного функционирования современных устройств используются монолитные интегральные схемы (МИС), которые состоят из большого количества активных и пассивных компонентов. Разработка таких схем происходит с помощью современных САПР, где элементы представлены в виде моделей. Набор таких моделей, т.е. библиотека элементов, позволяет качественно спроектировать необходимый прибор, а также провести симуляцию его работы в различных режимах питания, температуры и излучения. Кроме того, необходимо учитывать технологические особенности изготовления того или иного устройства, так как каждая фабрика имеет свои параметры производственных процессов. Одним из таких процессов является формирование диэлектрического слоя нитрида кремния, свойства которого определяются его стехиометрическим составом, который может несколько отличаться от  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Эти отличия будут влиять на величину диэлектрической проницаемости и, как следствие, тангенса угла диэлектрических потерь. Так как МИС используются в различных температурных режимах, необходимо исследовать температурные зависимости основных параметров элементов. Поэтому для уточнения свойств пленки  $\text{SiN}_x$  в настоящей работе

проведено исследование зависимости емкостных характеристик конденсаторов, изготовленных на её основе, от температуры.

Измерения характеристик МДМ-конденсаторов, изготовленных в Центре радиофоники и СВЧ технологий НИЯУ МИФИ [1], проводились с помощью векторного анализатора цепей PNA-X и зондовой станции MPI TS200-IFE в температурном диапазоне 25–125 °С с шагом 25 °С при частотах до 50 ГГц и мощности СВЧ-сигнала –10 dBm. Контроль параметров емкости производился путем анализа Z-параметров после деэMBEDдинга контактных площадок и линий:

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right), \text{ откуда } C = -\frac{1}{\text{Im}(Z) \cdot \omega}.$$

На рис. 1 представлено сравнение характеристик конденсатора в различных температурных режимах.

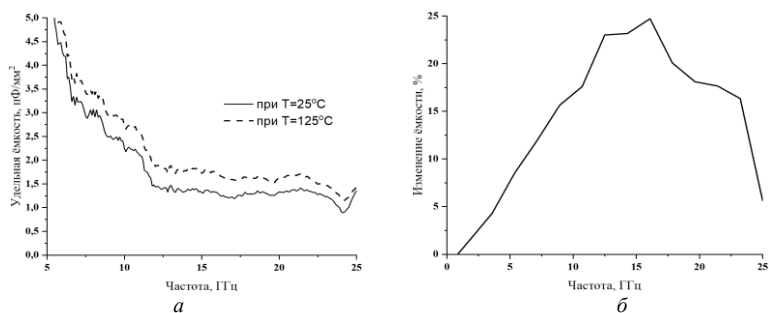


Рис. 1. а) Характеристики удельной ёмкости конденсатора при 25 и 125 °С в диапазоне частот 5...25 ГГц; б) Относительное изменение характеристик при нагреве от 25 до 125 °С в %

Показано, что изменение емкости МДМ структур составило более 15 % при увеличении температуры на 100 °С в диапазоне частот от 10 до 20 ГГц.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра радиофоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ в рамках проекта № FSWU-2023-0088.

#### Литература

1. И.С. Васильевский 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. – EDN BWXVYO.

**ВЛИЯНИЕ *in situ* ПАССИВИРУЮЩЕГО СЛОЯ SiN НА КОЛЛАПС ТОКА В AlGaN/AlN/GaN (HEMT)**

**\*В.Г. Мансуров<sup>1</sup>, Т.В. Малин<sup>1</sup>, Д.С. Милахин<sup>1</sup>, В.Е. Земляков<sup>2</sup>, В.И. Егоркин<sup>2</sup>,  
Н.В. Гуминов<sup>2</sup>, К.С. Журавлев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект ак. Лаврентьева, 13, e-mail: [mansurov@isp.nsc.ru](mailto:mansurov@isp.nsc.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет МИЭТ  
Россия, 124498, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, дом 1, e-mail: [vzml@rambler.ru](mailto:vzml@rambler.ru)

**EFFECT OF *in situ* SiN PASSIVATION ON CURRENT COLLAPSE  
IN AlGaN/AlN/GaN HEMTs**

**\*V.G. Mansurov<sup>1</sup>, T.V. Malin<sup>1</sup>, D.S. Milakhin<sup>1</sup>, V.E. Zemlyakov<sup>2</sup>, V.I. Egorkin<sup>2</sup>,  
N.V. Guminov<sup>2</sup>, K.S. Zhuravlev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
Russia, 630090 Novosibirsk, 13 Lavrentiev avenue, e-mail: [mansurov@isp.nsc.ru](mailto:mansurov@isp.nsc.ru)

<sup>2</sup>National Research University of Electronic Technology (MIET)  
Russia, 124498 Zelenograd, Moscow, Shokin square 1, e-mail: [vzml@rambler.ru](mailto:vzml@rambler.ru)

This work compares the characteristics of HEMT transistors based on Al-GaN/GaN heterostructures with 2DEG covered by *in situ* deposited surface layers: cap-GaN as a widely used coating and SiN coating. Pulsed current-voltage characteristics was measured from different quiescent points ( $V_{gs}$ ,  $V_{ds}$ ): NR = (0 V, 0 V), as well as GL = (-6 V, 0 V), DL = (-6 V, +20 V) to evaluate a gate-lag and drain-lag effects. A reduction of up to ~5 times the gate-lag effect for the sample with SiN coating compared to GaN capped sample was demonstrated.

Для реализации потенциала транзисторов с высокоподвижным электронным газом (HEMT) на основе широкозонных  $A_3$ -нитридов в высокочастотной и силовой электронике требуется решить ряд технологических задач, таких как: подавление коллапса тока, снижение токов утечек, повышение пробивного напряжения, повышение надежности транзисторов и др. Пассивация поверхности при нанесении диэлектрических слоев как *in situ*, так и *ex situ* на поверхность гетероструктур (ГЭС) способствует решению данных проблем и позволяет улучшить характеристики AlGaN/GaN HEMT транзисторов. В данной работе исследовано влияние тонкого пассивирующего слоя нитрида кремния, сформированного *in situ* на поверхности AlGaN/GaN гетероструктур, на свойства транзисторов и коллапс тока.

Гетероструктуры AlGaN/GaN с двумерным электронным газом были выращены в ИФП СО РАН (Новосибирск) в установке аммиачной МЛЭ Comcraft-21 (Рибер, Франция) на подложках 6H-SiC(0001). Сравниваются

гетероструктуры с одинаковой конструкцией слоев, но с различными покрытиями поверхности: А) с традиционным *cap*-слоем GaN ( $d = 1$  нм) и Б) пассивирующим слоем SiN ( $d = 3.5$  нм).

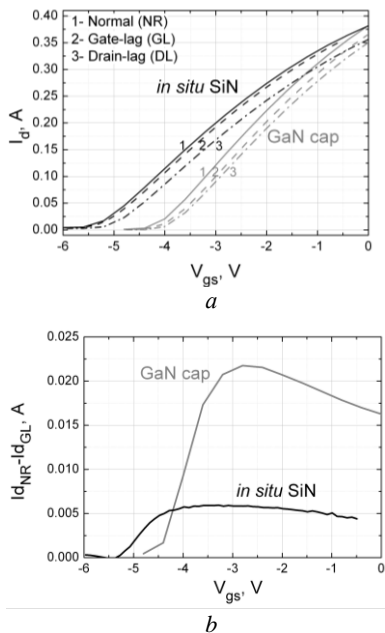


Рис. 1. а) Зависимости  $I_d(V_{gs})$  для образцов А) пассивированного SiN (черные) и Б) с *cap*-слоем GaN (серые) из трех точек покоя NR = (0 В, 0 В) (сплошная линия), L = (-В, 0 В) (штрих), DL = (-6 В, +20 В) (штрих-пунктир); б) разность токов  $I_{dNR} - I_{dGL}$  на стоке для двух образцов (gate-lag)

электронов, влияющих на ток в канале. Вероятно, данный эффект может быть связан со снижением плотности состояний на поверхности при пассивации, наблюдавшийся нами ранее на подобных структурах [1].

## Литература

1. V. Mansurov et al., Applied Surface Science **640**, 158313, (2023).

Параметры двумерного газа в гетероструктурах:  $n = 1.05 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu = 1700 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  и  $n = 1.29 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu = 1650 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  для образцов А и Б, соответственно. Тестовые транзисторы на основе данных ГЭС были изготовлены в МИЭТ (Зеленоград) и проведены измерения импульсных вольт-амперных характеристик (ВАХ).

На рис. 1а приведены передаточные ВАХ транзисторов, то есть зависимости выходного тока ( $I_d$ ) от напряжения на затворе ( $V_{gs}$ ) при фиксированном напряжении на стоке ( $V_{ds} = +10$  В), полученные из различных точек покоя ( $V_{gs}$ ,  $V_{ds}$ ). Gate-lag снижается до 2% на образце Б в сравнении с 9% на образце А, и, соответственно, drain-lag до 10% в сравнении с 15%. На рис. 1б хорошо видно снижение (до 4.5 раз) gate-lag эффекта на образце Б в сравнении с образцом А. Изменение разностных ВАХ наглядно демонстрирует влияние *in situ* пассивации слоем SiN на gate-lag в AlGaIn/GaN ГЭС, объясняемое снижением количества ловушек

**НАНЕСЕНИЕ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ  
СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК ЗОЛОТА НА ПОДЛОЖКИ КРЕМНИЯ И КВАРЦА**

*\*Д.А. Колосовский<sup>1</sup>, Д.В. Бекреева<sup>2</sup>, Т.М. Залялов<sup>3</sup>, С.А. Пономарёв<sup>3</sup>, Ю.Г. Шухов<sup>1</sup>,  
А.А. Морозов<sup>1</sup>, С.В. Старинский<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
Россия, 630090 г. Новосибирск, Проспект Академика Лаврентьева, дом 1  
e-mail: [dani1-ak@yandex.ru](mailto:dani1-ak@yandex.ru)

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090 г. Новосибирск, Улица Пирогова, дом 1, e-mail: [s.ponomarev1@g.nsu.ru](mailto:s.ponomarev1@g.nsu.ru)

<sup>3</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
Россия, 630090 г. Новосибирск, Улица Пирогова, дом 30, e-mail: [timz@isp.nsc.ru](mailto:timz@isp.nsc.ru)

**DEPOSITION OF ULTRATHIN GOLD FILMS ON SILICON  
AND QUARTZ SUBSTRATES BY PULSED LASER ABLATION**

*\*D.A. Kolosovsky<sup>1</sup>, D.V. Bekreeva<sup>2</sup>, T.M. Zalyalov<sup>3</sup>, S.A. Ponomarev,<sup>3</sup> Yu.G. Shukhov<sup>1</sup>,  
A.A. Morozov<sup>1</sup>, S.V. Starinskiy<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS  
Russia, 630090 Novosibirsk, Lavrentyev avenue 1, e-mail: [dani1-ak@yandex.ru](mailto:dani1-ak@yandex.ru)

<sup>2</sup>Novosibirsk State University  
Russia, 630090 Novosibirsk, Pirogova Street 1, e-mail: [s.ponomarev1@g.nsu.ru](mailto:s.ponomarev1@g.nsu.ru)

<sup>3</sup>Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS  
Russia, 630090 Novosibirsk, Pirogova Street 30, e-mail: [timz@isp.nsc.ru](mailto:timz@isp.nsc.ru)

In this report, it is demonstrated that pulsed laser ablation is a promising method for the deposition of continuous conductive gold films with a thickness of less than 10 nm. The surface morphology of the films was investigated by atomic force microscopy and scanning electron microscopy, the optical properties of the films were studied by spectrophotometry and the electrophysical properties were analysed by measurements of volt-ampere characteristics. The results show that the ultrathin films exhibit metallic properties down to a thickness of 4 nm, have high transmittance and low RMS surface roughness.

Сверхтонкие пленки золота, толщиной менее 10 нм, активно используются в гибких прозрачных электродах для оптоэлектронных приборов, тонкопленочных солнечных элементах, дисплеях и сенсорных экранах, фотодетекторах и светодиодах [1]. Выращивание сплошных и сверхтонких пленок золота на различных подложках, таких как кварц, оксид кремния, нитрид кремния, графен и т.д., как известно, затруднено из-за плохого смачивания золотом этих подложек, что приводит к формированию трехмерных островков на начальных этапах роста пленки. Формирование металлической пленки происходит по следующему механизму: зарождение островков,

рост островков, слияние островков, перколяция и заполнение каналов с образованием сплошной тонкой пленки. Для снижения порога перколяции сверхтонких пленок золота обычно используют адгезионные или затравочные слои [1], а также охлаждение подложки до криогенных температур [2]. Однако, использование адгезионных слоев приводит к увеличению оптических потерь и несовместимостью с требованиями оптоэлектронных устройств, а охлаждение подложки до криогенной температуры является сложной технологической задачей. В данной работе предлагается использовать метод импульсной лазерной абляции (ИЛА) для напыления сверхтонких пленок золота.

Напыление пленок осуществлялось в вакуумной камере в атмосфере кислорода при давлении 10 Па с помощью твердотельного импульсного Nd:YAG лазера с длиной волны ( $\lambda$ ) 532 нм. Анализ морфологии поверхности пленок проводился методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе Bruker Multimode 8 и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM 6700F. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) пленок проводилось на зондовой станции, оснащенной параметрическим анализатором полупроводниковых приборов Keithley 4200-SCS Semiconductor с модулем измерения сверхмалых токов 4210-SMU. Анализ оптических свойств пленок осуществлялся на спектрографе СФ-2000.

Результаты измерения ВАХ показали, что с уменьшением толщины пленок золота с 7,4 нм до 3,9 нм сопротивление растет с 50 Ом до 370 Ом, что говорит о хорошей электропроводности пленок. Увеличение электрического сопротивления с уменьшением толщины связано с перколяцией пленок, что подтверждается спектрами пропускания пленок. Анализ морфологии поверхности показал, что среднеквадратичная шероховатость поверхности не превышает 0.7 нм, что соответствует 2–3 монослоям. Параметр сплошности пленок, отношение площади поверхности, занимаемой пленкой, к площади подложки, варьируется от 1 до 0,9 для пленок толщиной 10–5 нм, в то время как в литературе такой параметр достигается лишь при охлаждении подложки до температуры 153 К [2].

В работе показано, что методом ИЛА можно напылять проводящие сверхтонкие пленки золота, толщиной менее 5 нм, на подложки кремния и кварца без использования адгезионных слоев и/или охлаждения подложки до криогенных температур.

#### Литература

1. D.I. Yakubovsky et al., Adv. Mat. Int. **6**, 1900196 (2019).
2. R. Lemasters et al., ACS Photonics **6**, 2600-2606 (2019).

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТИННО ОДНОМЕРНЫХ  
1D-КОНТАКТОВ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ**

**\*Н.А. Топхов**

Севастопольский государственный университет (СевГУ)  
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33, e-mail: [natorkhov@mail.sevsu.ru](mailto:natorkhov@mail.sevsu.ru)  
Томский государственный университет (ТГУ)  
Россия, 634050, г. Томск, Проспект Ленина, дом 36, e-mail: [trkf@mail.ru](mailto:trkf@mail.ru)

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF TRUE ONE-DIMENSIONAL  
1D METAL-SEMICONDUCTOR CONTACTS WITH A SCHOTTKY BARRIER**

**\*N.A. Torkhov**

Sevastopol State University (SevSU)  
Russia, 299053, Sevastopol, st. Universitetskaya, 33, e-mail: [natorkhov@mail.sevsu.ru](mailto:natorkhov@mail.sevsu.ru)  
Tomsk State University (TSU)  
Russia, 634044, Tomsk, Lenin Avenue, building 36, e-mail: [trkf@mail.ru](mailto:trkf@mail.ru)

Static current-voltage characteristics of truly one-dimensional metal-semiconductor contacts with a Schottky barrier are presented.

Основные характеристики трёхмерных 3D-контактов Шоттки определяются трехмерной 3D-топологией ( $D_T = 3$ ) области их пространственного заряда (ОПЗ) и двумерным интерфейсом контакта металл-полупроводник (МП) ( $D_T = 2$ ). Такая 3D-топология контактов Шоттки в большинстве случаев подразумевает классическое или полуклассическое описание физических процессов токопереноса (диффузионная и термоэмиссионная теории) во многом уже исчерпала свои возможности.

В рамках проектов DARPA MPC и ARPAe SWITCHES это привело к исследованию и созданию двумерных («Lateral» [1, 2]) 2D-контактов МП с БШ, которые в общем случае образованы 2D-слоем полупроводника ( $D_T = 2$ ) вблизи гетероперехода содержащем двухмерный 2D-электронный газ с повышенной подвижностью электронов  $\mu_e$ , и одномерным 1D-интерфейсом металл-полупроводник ( $D_T = 1$ ) с торца 2D-слоя. В результате, уменьшение размерности системы контактов Шоттки всего на единицу (сопровождающееся также и уменьшением массо-габаритных показателей) привело к значительному улучшению их приборных характеристик (например, увеличению рабочих токов до 12 А (при  $U = +1.5$  В) и повышению напряжения пробоя до 780–1900 В [2, 3], значительному увеличению рабочего частотного диапазона в составе смесителя до 300–360 ГГц [4]).

Нами было обнаружено, что дальнейшее понижение топологической размерности системы контакта Шоттки до единицы  $D_T = 1$  одновременно с уменьшением массогабаритных показателей продолжает сопровождаться и



улучшением его характеристик. С применением методов атомно-силовой микроскопии нами впервые были получены истинно одномерные 1D-контакты Шоттки на основе одномерного полупроводникового объекта – выходящей на поверхность эпитаксиального слоя n-GaN{0001} линейной дислокации и сформированным к её торцу ноль-мерным 0D-интерфейсом ( $D_T = 0$ ) контакта металлизированного  $W_2C$  острия иглы кантилевера диаметром  $< 10$  нм. Приборные характеристики таких 1D-контактов во многом будут определяться не только 0D-интерфейсом, но и одномерной топологией линейной дислокации. Было обнаружено, что ВАХ таких 1D-контактов МП с барьером Шоттки существенно отличается от ВАХ обычных 3D- и 2D-контактов Шоттки. В частности, было найдено сверхнизкое значение эффективной высоты барьера  $\phi_{bt} \sim 0.1$  эВ и крайне низкие токи утечки при больших для таких размеров пробивных напряжениях  $U_{br} > 10$  В (ограничено техническими возможностями АСМ), которые не могут быть описаны с использованием существующих моделей токопереноса в контактах Шоттки.

Полученные результаты указывают на то, что одномерные 1D-контакты Шоттки могут иметь уникальные электрофизические свойства и множество интригующих возможностей таких, например, как: значительное повышенные подвижности электронов; повышение качества интерфейса, сильную спин-орбитальную связь в сочетании с уникальным явлением блокировки спин-долина [5], перестраиваемую ширину запрещенной зоны [6], богатую физику экситонов [7], возможность формирования однофотонных излучателей [8] и исследование эффектов квантовой запутанности.

#### Литература

1. Dudekula, Shaikshavali and Dhanaraj Kannadassan. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. DOI:10.1080/09205071.2021.1956374.
2. Mohammad Wahidur Rahman, Hareesh Chandrasekar, Towhidur Razzak, Siddharth Rajan. IEEE Electron Device Letters **36**(4):1-1. DOI:10.1109/LED.2015.2404309.
3. Jae-Hoon Lee, Ki-Sik Im, Jong Kyu Kim and Jung-Hee Lee. IEEE Transactions on electron devices. **66**(1) 324-329 (2019).
4. Bertrand Thomas, Alain Maestrini and Gérard Beaudin. IEEE Microwave and wireless components letters. **15**(12) 865-867 (2005).
5. K. F. Mak, K. L. McGill, J. Park, and P. L. McEuen. Science. **344**, 1489 (2014).
6. K. He, C. Poole, K. F. Mak, and J. Shan. Nano Lett. **13**, 2931 (2013).
7. K. Tran, *et al.* Nature **567**, 71 (2019).
8. Y. M. He, *et al.* Nat. Nanotechnol. **10**, 497 (2015).

## ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ X-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

\**А.М. Кулиш*<sup>1,2</sup>, *В.В. Лосев*<sup>1</sup>, *А.В. Кондратенко*<sup>2</sup>, *П.С. Сорвачев*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Россия, 124498, Зеленоград, Москва, пл. Шокина, д. 1, e-mail: [artem111mass@gmail.com](mailto:artem111mass@gmail.com)

<sup>2</sup>АО «Микроволновые системы»

Россия, 105122, Москва, ш. Щелковское, д.5, стр. 1, e-mail: [kulish@mwsystems.ru](mailto:kulish@mwsystems.ru)

### X-BAND INTEGRATED LOW-NOISE AMPLIFIER

\**А.М. Kulish*<sup>1,2</sup>, *V.V. Losev*<sup>1</sup>, *A.V. Kondratenko*<sup>2</sup>, *P.S. Sorvachev*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research University «MIET»

Russia, 115409, Zelenograd, Moscow, e-mail: [artem111mass@gmail.com](mailto:artem111mass@gmail.com)

<sup>2</sup>«Microwave Systems» JSC

Russia, 105122, Moscow, e-mail: [artem111mass@gmail.com](mailto:artem111mass@gmail.com)

X-band (8...12 GHz) microwave monolithic integrated circuits (MMICs) of low-noise amplifiers (LNAs) are an essential part of the receiver of active electronically scanned arrays (AESA) and other radar systems [1]. The main requirements for the LNA MMIC are low noise and high gain, low DC power consumption and a minimum MMIC area.

Монолитные интегральные схемы (МИС) малошумящих усилителей (МШУ) X-диапазона частот (8...12 ГГц) являются незаменимой частью приемного тракта активных фазированных антенных решеток (АФАР) и других радиолокационных систем [1]. Основными требованиями, предъявляемыми к МИС МШУ, являются низкий коэффициент шума и высокий коэффициент усиления, малая потребляемая от источника питания мощность и минимальная площадь МИС.

В данной работе описан процесс и приводятся результаты проектирования GaAs МИС МШУ X-диапазона частот с использованием библиотеки моделей нормально открытых транзисторов с высокой подвижностью электронов с длиной затвора 0.5 мкм «pHEMT05D» компании АО «Светлана-Рост». Параметры МШУ, полученные в результате проектирования, представлены в табл. 1. Для одновременного достижения минимального коэффициента шума ( $K_{ш}$ ) и согласования входного импеданса МШУ с нагрузкой 50 Ом была применена техника совмещенного согласования, которая была описана в работе [2]. Безусловная устойчивость МИС в диапазоне частот от 0 ГГц до 36 ГГц (частота единичного усиления транзистора) была достигнута за счет введения резистивных элементов в согласующие цепи и цепи ввода питания и параллельной обратной связи по напряжению во втором каскаде усилителя [3].

Таблица 1

## Параметры МИС МШУ

Параметр	Значение
Диапазон частот, ГГц	8–12
$ S_{21} $ , дБ	20
$ S_{11} ,  S_{22} $ , дБ	–10, –10
$K_{ш}$ (мин), дБ	2.0
$P_{\text{вст.пнт.}}$ , мВт	300
Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	1.9

Таким образом, благодаря использованным подходам к проектированию, МИС МШУ на основе технологического процесса «pHEMT05D» АО «Светлана-Рост» удовлетворяет требованиям для применения в приемопередающей аппаратуре X-диапазона частот.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания №075-03-2024-061 от 17 января 2024 г.

**Литература**

1. Saquib, M. Comparative Survey of Techniques and Technologies Used in Transmit Path of Transmit Receive Module of AESA Radar / M. Saquib, M. S. Arif, R. Akmal // 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). – IEEE, – 2019. – P. 1021–1028.
2. Текшев, В. Б. Двухтранзисторный СВЧ усилитель с минимальным коэффициентом шума и согласованным входом и выходом / В. Б. Текшев // Общие вопросы радиоэлектроники. – 1990. – Т. 15. – С. 16–23.
3. Шварц, Н. З. Линейные транзисторные усилители СВЧ / Н. З. Шварц. – М.: Советское радио, 1980. – 368 с.

## ЭКВАЛАЙЗЕР ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КАНАЛА ПРИЕМА ДАННЫХ

*\*Д.В. Мельников, Н.М. Горшкова*

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: [netadm@miec.ru](mailto:netadm@miec.ru)  
АО НПЦ «ЭЛВИС»  
Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, дом 14, строение 14  
e-mail: [secretary@elvees.com](mailto:secretary@elvees.com)

## EQUALIZER FOR HIGH-SPEED DATA RECEIVER CHANNEL

*\*D.V. Melnikov, N.M. Gorshkova*

National Research University «MIET»  
Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin Square, Bld. 1, e-mail: [netadm@miec.ru](mailto:netadm@miec.ru)  
JSC SPC «ELVIS»  
Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Konstruktora Lukina St., Bld. 14/14  
e-mail: [secretary@elvees.com](mailto:secretary@elvees.com)

In this paper, the problem of an equalizer design for high-speed receiver channel with data rate up to 12,5 Gb/s is touched upon. An equalizer is needed to improve the amplitude of the input signal and reduce its jitter. Using special design techniques, an equalizer with a bandwidth up to 17,7 GHz, a gain up to 47,1 dB, low supply voltage and power consumption was developed.

Ключевая роль в процессе высокоскоростной передачи информации по линиям связи отводится оптическим трансиверам. Вероятно, самым комплексным компонентом этих устройств является приемопередающая микросхема, а сложно-функциональные (СФ) блоки в ее составе позволяют наиболее полно реализовать преимущества высокоскоростной передачи данных по линиям связи. Одним из СФ-блоков микросхемы является эквалайзер канала приема. Эквалайзер предназначен для компенсации несовершенства среды передачи, критичной на высоких частотах [1]. Он выравнивает амплитуду входного сигнала и уменьшает джиттер после его прохождения через линию передачи.

Согласно требованиям, предъявляемым к приемопередающей микросхеме для оптических трансиверов, проектируемый эквалайзер должен поддерживать прием данных со скоростью до 12,5 Гбит/с, обладать полосой пропускания до 17 ГГц и коэффициентом усиления не менее 40 дБ, а также иметь напряжение питания не более 2 В и потребляемую мощность до 20 мВт.

Так, разработанный СФ-блок эквалайзера имеет в своем составе следующие каскады (рис. 1):

- первый каскад – К1: дифференциальная пара с регулируемым коэффициентом усиления постоянного сигнала, положением максимума усиления и опорным током каскада;
- второй каскад – К2: структурно и функционально совпадает с первым каскадом, а также имеет вход управления нагрузкой;
- третий каскад – К3: буфер с возможностью коррекции смещения нуля, которая осуществляется обратной связью через дифференциальный усилитель ДУ и фильтр нижних частот ФНЧ.

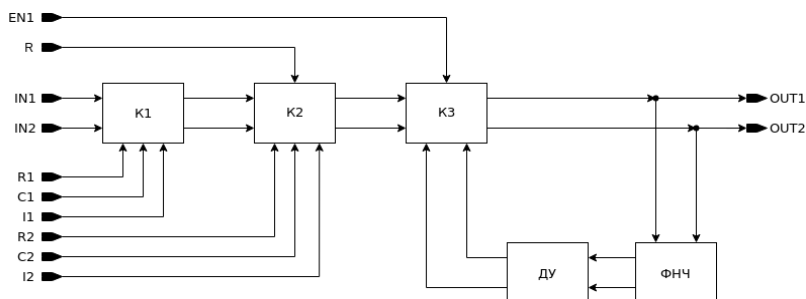


Рис. 1. Структурная схема эквалайзера

При проектировании топологии СФ-блока эквалайзера были использованы приемы, которые позволяют избежать рассогласования характеристик критичных элементов вследствие разброса параметров технологического процесса. Так, в дифференциальных парах транзисторы были расположены симметрично в виде массива элементов с одинаковой ориентацией, а резисторы, размещенные аналогично, разделены на идентичные сегменты [2].

Таким образом, разработан эквалайзер для высокоскоростного канала приема данных, который поддерживает прием данных со скоростью до 12,5 Гбит/с, обладает полосой пропускания от 10,8 до 17,7 ГГц, коэффициентом усиления до 47,1 дБ, имеет напряжение питания 0,9 В и потребляемую мощность 9,7 мВт.

#### Литература

1. B. Razavi The design of an equalizer — Part one // IEEE Solid State Circuits. – 2021. – Vol. 13. No. 4. – P. 7–12.
2. Е.В. Кириллова Физическое проектирование прецизионных аналоговых блоков в цифро-аналоговых ИМС // Компоненты и технологии. – 2007. – № 6. – P. 154–163.

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВЧ МИС НА ОСНОВЕ  
ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР НИТРИДА ГАЛЛИЯ  
НА ПЛАСТИНАХ КРЕМНИЯ С ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ НОРМОЙ 0,15 мкм**

*\*М.Л. Занавескин*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
Россия, 123182, г. Москва, площадь Академика Курчатова, дом 1  
e-mail: [Zanaveskin\\_ml@nrcki.ru](mailto:Zanaveskin_ml@nrcki.ru)

**TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR MMIC BASED ON GALLIUM NITRIDE  
HETEROEPITAXIAL STRUCTURES  
ON SILICON SUBSTRATES WITH 0,15 mkm PROCESS**

*\*M.L. Zanaveskin*

The National Research Center Kurchatov Institute  
Russia, 123182 Moscow, 1 Kurchatov Square, e-mail: [Zanaveskin\\_ml@nrcki.ru](mailto:Zanaveskin_ml@nrcki.ru)

The National Research Center «Kurchatov Institute» is developing a technology for obtaining MMIC with 0,15 mkm process for the frequency range of 0,1–30 GHz. The work is carried out on gallium nitride heterostructures on silicon wafers with a diameter of 100 mm. Currently, transistors using stand alone gate technology with a total gate width from 0,1 to 0,8 mm have been obtained and tested.

В настоящее время ведется активная разработка и внедрение полупроводниковых приборов на основе наногетероструктур нитрида галлия (GaN) [1]. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) на основе гетероструктур нитрида галлия являются одним из востребованных компонентов для микроэлектроники СВЧ и КВЧ диапазонов, монолитных интегральных схем (МИС) миллиметрового диапазона частот для их применений в средствах связи, радиолокации и радиоэлектронной борьбы [2]. Использование для изготовления GaN гетероструктур подложек кремния позволяет снизить стоимость изготовления гетероструктур за счет отказа от дорогих пластин карбида кремния и применения существующих технологий обработки кремния. Кроме того, использование пластин большого диаметра (до 200мм) позволяет производить масштабирование разработанной технологии.

В НИЦ «Курчатовский институт» ведется разработка технологии создания СВЧ МИС с топологической нормой 0,15 мкм для диапазона частот 0,1–30 ГГц. Работа проводится на гетероструктурах нитрида галлия на пластинах кремния диаметром 100 мм. На настоящий момент созданы и испытаны

базовые транзисторы с суммарной шириной затвора от 0,1 до 0,8 мм. Ключевыми элементами данной технологии являются:

- использование эпитаксиальных дорасширяемых контактов с сопротивлением к двумерному электронному газу на уровне  $0,1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ ;
- использование отдельно стоящих (stand alone) затворов, что позволяет снизить паразитные емкости.

Внедрение данных подходов позволяет сблизить контакты транзистора вплоть до 1 мкм, что открывает широкие перспективы для улучшения частотных характеристик СВЧ устройств.

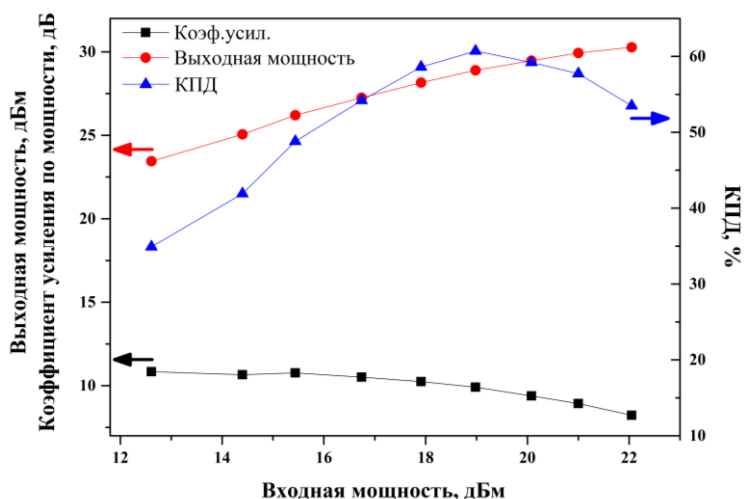


Рис. 1. Зависимость выходной мощности, коэффициента усиления и КПД от входной мощности для транзистора  $2 \times 100 \text{ мкм}$ . Измерения были проведены на частоте 15 ГГц

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

#### Литература

1. Ю.В. Фёдоров и др., Нано- и микросистемная техника, № 4, 217 (2016).
2. А.А. Кищинский, Электроника: наука, технология, бизнес, № 10, 44 (2020).

**ШИРОКОПОЛОСНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ ПАТЧ АНТЕНН  
С ЕМКОСТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В SAR C-ДИАПАЗОНА  
И СЕТЯХ 5G**

*\*А.Д. Саури, В.А. Клоков, Н.И. Каргин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., 31, e-mail: [ADSauri@mephi.ru](mailto:ADSauri@mephi.ru)

**WIDEBAND ANTENNA ARRAY BASED ON PATCH ANTENNAS  
WITH CAPACITIVE COUPLE FOR APPLICATION IN C-BAND SAR  
AND 5G NETWORKS**

*\*A.D. Sauri, V.A. Klokov, N.I. Kargin*

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoye h., 31, e-mail: [ADSauri@mephi.ru](mailto:ADSauri@mephi.ru)

Currently, to achieve large operating bandwidths of antennas, they resort to relatively complex designs, however, the analysis carried out in [1–3] shows the possibility of implementing simpler broadband capacitive coupled patch antennas. In this work, additional optimization of such a patch antenna was carried out, a 2 x 2 antenna array and a common-mode power supply system were developed, manufactured and verified, and design models for 2 x 4 and 4 x 4 arrays were proposed.

На настоящий момент для достижения больших рабочих полос антенн прибегают к сравнительно сложным конструкциям, однако проведенный анализ в работах [1–3] показывает возможность реализации более простых широкополосных патч антенн с емкостной связью. В данной работе проведена дополнительная оптимизация такой патч антенны, разработан, изготовлен и верифицирован массив антенн 2 x 2, а также предложены модели конструкций массивов 2 x 4 и 4 x 4.

На рис. 1 показаны внешний вид(а), графики коэффициента отражения и КСВ(б) дополнительно оптимизированной антенны. Антенна представляет собой двух уровневую структуру, с воздушным зазором  $h = 3$  мм. На верхней стороне располагаются активный и пассивный резонаторы с габаритными размерами 7 x 3 и 20 x 14 мм соответственно, между которыми выполнен зазор емкостной связи шириной  $s = 1$  мм. На нижнем уровне с внутренней стороны выполнен рефлектор, а с обратной микрополосковый фидер.

Рабочая полоса антенны по уровню КСВ  $< 2$  составляет  $\Delta F = 6,26 - 5,06 = 1,2$  ГГц. Диаграмма направленности (ДН) имеет каплевидную форму с шириной главного лепестка (ГЛ)  $\varphi = 80^\circ$  и  $K_u = 7,3$  дБи.



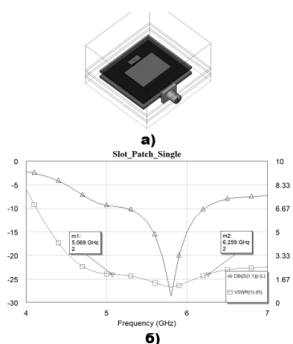


Рис. 1. Внешний вид (а) и графики коэффициента отражения и КСВ (б) патч антенны

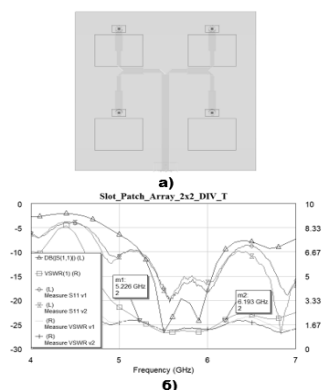


Рис. 2. Внешний вид (а) и графики коэффициента отражения и КСВ (б) массива антенн 2x2

пазона типа SAR при использовании широкополосных зондирующих sweep-сигналов.

### Литература

1. Kasabegoudar V. G. et al. Design studies of ultra-wideband microstrip antennas with a small capacitive feed (2007).
2. Kasabegoudar V. G., Vinoy K. J. A wideband microstrip antenna with symmetric radiation patterns (2008).
3. Reddy P., Kasabegoudar V. G. Gap coupled suspended ultra-wideband microstrip antennas for 5G applications (2023).

На рис. 2 показаны внешний вид (а) разработанного массива антенн, графики коэффициента отражения и КСВ (б) модели и изготовленного макета. Период решетки равен четверти длины волны, запитка осуществлена на основе Т – соединений.

Рабочая полоса антенны ( $K_{CB} < 2$ ) составляет  $\Delta F_M = 6,2 - 5,22 = 0,98$  ГГц, ширина полосы изготовленного образца  $\Delta F_{ио} = 6,3 - 4,8 = 1,5$  ГГц.

Оценки ГЛ и усиления антенны близки к модельным значениям  $\varphi = 40^\circ$  и  $K_u = 13$  дБ.

Для формирования различных видов ДН были рассмотрены конфигурации массивов вида  $2 \times 4$  и  $4 \times 4$ .

Центральные рабочие частоты массивов составляют  $F_c \sim 5,5$  ГГц, ширина полос пропускания  $\Delta F \sim 1$  ГГц.

ДН массива  $2 \times 4$  имеет форму веера с ширинами ГЛ  $\varphi_0 = 20^\circ$  и  $\varphi_{90} = 40^\circ$  в перпендикулярной плоскости,  $K_u$  составляет 16 дБ. ДН массива  $4 \times 4$  имеет форму капли с шириной ГЛ  $\varphi = 20^\circ$  и  $K_u = 19$  дБ.

Полученные модели удовлетворяют требованиям широкополосных сигналов сетей 5го поколения и также могут быть применены в составах радаров С-диа-

**КВАНТОВЫЕ КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ИК И ТГц ДИАПАЗОНОВ  
ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ**

**\*В.Л. Вакс<sup>1,2</sup>, В.А. Анфертьев<sup>1,2</sup>, Е.Г. Домрacheва<sup>1,2</sup>, М.Б. Чернышева<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН

Россия, 603950, г.Нижний Новгород, ГСП-105, e-mail: [vax@ipmras.ru](mailto:vax@ipmras.ru)

<sup>2</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Россия, 603022, г.Нижний Новгород, Проспект Гагарина, дом 23, e-mail: [vaks@nifti.unn.ru](mailto:vaks@nifti.unn.ru)

**QUANTUM CASCADE LASERS OF IR AND THz FREQUENCY RANGES  
FOR SPECTROSCOPY**

**\*V.L. Vaks<sup>1,2</sup>, V.A. Anfertev<sup>1,2</sup>, E.G. Domracheva<sup>1,2</sup>, M.B. Chernyaeva<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>IPM RAS

Russia, 603950 Nizhny Novgorod, GSP-105 e-mail: [vax@ipmras.ru](mailto:vax@ipmras.ru)

<sup>2</sup>Lobachevsky State University

Russia, 603022 Nizhny Novgorod, Gagarin av. 23, e-mail: [vaks@nifti.unn.ru](mailto:vaks@nifti.unn.ru)

Actual problems in the gas analysis are associated with developing the methods of analysis of multicomponent gas mixtures for various applications including the spectroscopy methods. The main problem of high precise spectroscopy is the development of high-stable tunable coherent radiation sources. The modern high-resolution spectroscopic requirements to radiation sources are frequency stabilization with accuracy  $\sim 10^{-8}$ – $10^{-10}$  from carrier frequency, Doppler resolution, high spectral purity and smooth tuning of frequency in wide frequency range.

The special consideration is given to possibility of using the behavior THz and IR quantum cascade lasers (QCL) for application in spectroscopy. QCL working in continuous and pulse modes are used for IR range and will be used for THz frequency range. The development of THz emitters based on QCL in frequency range of 2–4 THz is presented. The use of THz and IR QCL for high resolution gas spectroscopy medical and biological applications is presented.

К перспективным для спектроскопии источникам излучения относятся квантовые каскадные лазеры (ККЛ). ККЛ представляют собой униполярные полупроводниковые лазеры, основанные на межподзонных переходах в гетероструктурах. В отличие от традиционных диодных лазеров, где оптические переходы идут между зонами и приводят к рекомбинации электронов и дырок, в ККЛ все переходы совершаются только электронами и идут между подзонами, принадлежащими одной зоне проводимости [1]. Современные ККЛ работают в широкой области ИК диапазона при комнатной температуре и позволяют получить мощность излучения десятки Ватт в режиме непрерывной генерации. Наилучшие характеристики были получены

для лазеров на основе InGaAs/AlInAs/InP в диапазоне от 3,5 до 16 мкм. В ТГц диапазоне ККЛ работают в области от 1,2 до 5,4 ТГц [2] с наилучшей демонстрацией своих характеристик между 3 и 4 ТГц. Ранее показаны возможности управления частотой ТГц ККЛ [3] и создания источников на основе ТГц ККЛ для применения в спектроскопии, например, работающего в режиме быстрого свипирования частоты [4].

Для применения ККЛ в качестве источника излучения необходимо знать его характеристики, чтобы осуществлять контроль частоты лазера и ее перестройку. Целью работы являлось исследование характеристик ИК и ТГц ККЛ для дальнейшего использования их в качестве источников излучения для спектроскопии и проведение тестовых спектроскопических измерений с их использованием.

В работе проведены исследования характеристик ряда образцов ККЛ ТГц и ИК диапазонов. Например, спектр сигнала промежуточной частоты ККЛ, работающего вблизи 2 ТГц, приведен на рис. 1. Частота генерации в непрерывном режиме, определенная гетеродинным методом, составила 2008,428 ГГц. Мощность ККЛ, составляющая 0,44 мВт, оценивалась с использованием ячейки Голя.

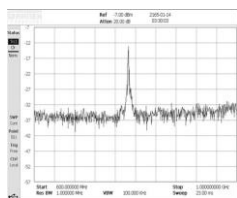


Рис. 1. Спектр сигнала промежуточной частоты ККЛ

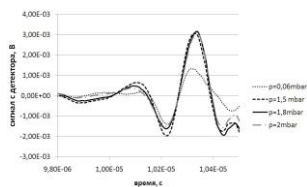


Рис. 2 Линия метанола ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) на частоте 2,019071156 ТГц (10 9 0 ← 9 8 0) для различных давлений (импульсный режим работы ТГц ККЛ)

С применением ТГц и ИК ККЛ проведены спектроскопические измерения линий поглощения ряда веществ, важных для биологии и медицины (в частности, биомаркеров некоторых патологий (рис. 2)).

Работы по измерению характеристик ККЛ выполнены при поддержке РФФИ (грант 21-72-30020, <https://rscf.ru/project/21-72-30020/>).

### Литература

1. B. Williams Nature Photonics. **1**, 517 (2007).
2. B. Röben, X. Lü, K. Biermann, L. Schrottke, H. T. Grahn. J. Appl. Phys. **125**, 151613 (2019).
3. D. J. Hayton, A. Khudchenko et al. Appl. Phys. Lett., **103**, 051115 (2013).
4. В.Л.Вакс, В.А.Анфертьев и др. Изв. вузов. Радиоп физика. **65**(10) 835 (2022).

**ПОТЕРИ В ДВОЙНОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ  
КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА,  
РАССЧИТАННЫЕ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ МАРКАТИЛИ**

*\*Б.А. Жмудь<sup>1,2</sup>, А.С. Соболев<sup>2</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН  
Москва, Нагорный проезд, дом 7, 117105, e-mail: [zhmud.ba@phystech.edu](mailto:zhmud.ba@phystech.edu)

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)  
Институтский переулок, д. 9, г. Долгопрудный, 141701

**LOSSES IN A DOUBLE METAL WAVEGUIDE OF A QUANTUM CASCADE LASER,  
CALCULATED BY THE MODIFIED MARCATILI METHOD**

*\*B.A. Zhmud<sup>1,2</sup>, A.S. Sobolev<sup>2</sup>, R.A. Khabibullin<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>V.G. Mokerov Institute of ultra-high frequency semiconductor electronics of RAS  
Russia, Moscow, Nagornij proezd 7, 117105 e-mail: [zhmud.ba@phystech.edu](mailto:zhmud.ba@phystech.edu)

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, 141701

In this work, we applied the modification of Marcatili method for correct calculation of the loss parameter in a double metal (DM) waveguide of a quantum cascade laser (QCL). The approximation used is based on the formulation of metallic boundary conditions (or Leontovich conditions) in the region of metal contacts, as well as the calculation of the dielectric constant of the active region in the effective medium approximation. For greater accuracy, in addition to the effective medium approximation, the dielectric constant of each layer of the QCL cascade was calculated using the Drude-Lorentz formula.

In the obtained model, a QCL with a DM waveguide was initially considered without additional thin heavily doped layers (see Fig. 1), providing ohmic contact with the metal. The presence of these layers can be taken into account in our model using their equivalent circuit, which ultimately changes the effective value of the surface impedance of the metal contact. The advantage of the developed approach is a significant reduction in computation time, since only algebraic transcendental equations need to be solved numerically, which requires much less computing power compared to the numerical solution of the two-dimensional Helmholtz equation.

В работе были произведены расчеты параметра потерь в двойном металлическом (ДМ) волноводе квантово-каскадного лазера (ККЛ). Данные расчеты основаны на аналитической модели распределения электромагнитного поля, которая является модификацией известного метода Маркатили для случая прямоугольного диэлектрического волновода. В основе исполь-

зованного приближения лежит постановка металлических граничных условий (либо условиями Леонтовича) в области металлических контактов, а также расчет диэлектрической проницаемости активной области в приближении эффективной среды. Для большей точности помимо приближения эффективной среды диэлектрическая проницаемость каждого слоев каскада ККЛ была рассчитана по формуле Друде-Лоренца. Пример расчета потерь в двойном металлическом волноводе ККЛ с широко известным трехъянным GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As дизайном каскада изображен на рис. 1.

В полученном в рамках нашей модели приближенном решении, ККЛ с ДМ волноводом изначально рассматривался без дополнительных тонких сильнолегированных слоёв (см. рис. 1), обеспечивающих омический контакт с металлом. Учесть наличие этих слоёв в нашей модели можно с помощью их эквивалентной схемы, что итоге меняет эффективное значение поверхностного импеданса металлического контакта. Результат расчета потерь с учетом сильнолегированных контактных слоев представлен на рис. 2. Преимуществом разработанного подхода является существенное сокращение времени вычислений, так как численно решать в нем необходимо только алгебраические трансцендентные уравнения, что требует много меньшей вычислительной мощности по сравнению с численным решением двумерного уравнения Гельмгольца.

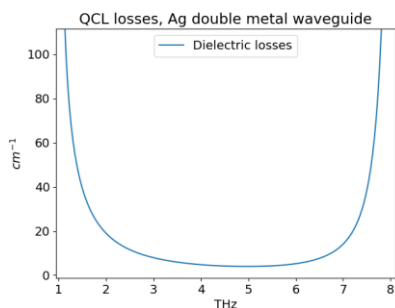


Рис. 1. Диэлектрические потери в ДМ волноводе ККЛ с типичным трехъянным GaAs/Al-GaAs дизайном в приближении средней по каскаду концентрации электронов  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , рассчитанные при температуре 100 К

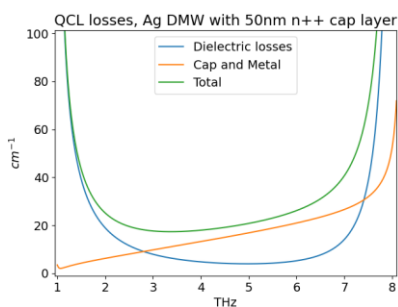


Рис. 2. Потери в ДМ волноводе GaAs/Al-GaAs ТГц ККЛ с учетом 50 нм контактных слоёв с концентрацией электронов  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , рассчитанные при температуре 100 К

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Фонда имени члена-корреспондента РАН, профессора Мокерова В.Г.

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН  
ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ**

*\*Д.В. Лаврухин<sup>1</sup>, А.Э. Ячменев<sup>1</sup>, Ю.Г. Гончаров<sup>2</sup>, К.И. Зайцев<sup>2</sup>, И.Е. Спектор<sup>2</sup>,  
Д.С. Пономарёв<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН  
Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр. 5, e-mail: [isvch@isvch.ru](mailto:isvch@isvch.ru)  
<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН»  
Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, дом 38, e-mail: [office@gpi.ru](mailto:office@gpi.ru)

**NEW APPROACHES TO OPTIMIZATION OF PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS  
FOR GENERATION AND DETECTION OF THz RADIATION**

*\*D.V. Lavrukhin<sup>1</sup>, A.E. Yachmenev<sup>1</sup>, Yu.G. Goncharov<sup>2</sup>, K.I. Zaytsev<sup>2</sup>, I.E. Spector<sup>2</sup>  
D.S. Ponomarev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Mokrov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the RAS  
Russia, 117105 Moscow, Nagorny proezd 7, str. 5, e-mail: [isvch@isvch.ru](mailto:isvch@isvch.ru)

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS  
Russia, 119991, Moscow, Vavilova 38, e-mail: [office@gpi.ru](mailto:office@gpi.ru)

This work is devoted to the creation and experimental verification of the complex model for generation and detection of pulsed terahertz radiation by photoconductive antennas (PCAs). The proposed model was experimentally verified using original PCAs based on LT-GaAs and multi-period InGaAs/InAlAs superlattices as photoconductors.

Спектроскопия с регистрацией формы терагерцовых (ТГц) импульсов активно развивается с середины 80-х годов XX века и в настоящее время применяется для решения множества фундаментальных и прикладных задач [1–3]. Благодаря компактности и надежности, высоким значениям отношения сигнал/шум, а также рабочей полосе  $\sim 0,1\text{--}5,5$  ТГц, для генерации и детектирования электромагнитных импульсов ТГц-диапазона частот в современных спектрометрах активно используют фотопроводящие антенны (ФПА). Несмотря на значительные продвижения в области технологии ФПА [4, 5], задачи оптимизации таких устройств – в частности, управление спектром и повышение мощности (для источников) и снижение уровня шума (для приемников), остаются актуальной.

В работе предложена и экспериментально верифицирована комплексная физико-математическая модель генерации и детектирования ТГц импульсов, одновременно учитывающая пространственные и временные характеристики лазерного излучения, транспортные характеристики фотопроводящего материала и влияние топологии электродов антенны. В случае острой фокусировке лазерного излучения, электрическое сопротивление фотопроводника в зазоре ФПА  $R_s$  представляет собой сумму двух сопро-

тивлений – для области фокального пятна и периферийной части полупроводника в зазоре, величины которых могут быть получены в рамках одной модели Друде.

Спектр ТГц излучения ФПА-источника определяется частотно-зависимой эффективностью согласования импеданса антенны  $Z_a$  ( $\nu$ ) и сопротивления фотопроводника  $R_s$ :  $\eta_m = 1 - \left| \frac{Z_a - R_s}{Z_a + R_s} \right|^2$ . Данный относительно простой

подход к управлению формой и энергетическими параметрами ТГц-спектра на стадии проектирования топологии ФПА был верифицирован в работе экспериментально, путем сравнительного исследования образцов ФПА-источников со спиральной топологией электродов, отличающихся степенью закрутки, на основе фотопроводящих слоев LT-GaAs [6].

Известно, что для ФПА-детекторов доминирует шум тепловой природы. Так как для теплового шума среднеквадратичное значение силы тока  $\propto 1/\sqrt{R_s}$ , то его можно минимизировать не только подбором фотопроводящего материала, но и за счет уменьшения размеров фокального пятна лазерного зондирования – т.е. путем увеличения вклада в  $R_s$  сопротивления периферийной части полупроводника в зазоре. В предложенной модели учитывается, что из-за неустраняемой асимметрии электродов и/или формы фокального пятна к тепловому шуму также будет добавляться дробовой шум, связанный с протеканием в зазоре ФПА – детектора тока диффузионной природы [3].

Для демонстрации возможности оптимизации характеристик детекторов были использованы образцы ФПА с топологией электродов «галстук-бабочка» на основе фотопроводящих многопериодных сверхрешеточных гетероструктур InGaAs/InAlAs на подложках GaAs: решеточно-согласованных (РС) и оригинальных структур с введенными при эпитаксиальном росте упругими напряжениями (УН) [7]. Образцы ФПА-детекторов на основе УН продемонстрировали значительное снижение мощности шума по сравнению с ФПА-детектором на основе аналогичной РС гетероструктуры.

#### Литература

1. M. Koch, et al., Nat. Rev. Methods Primers. **3**, 48 (2023).
2. P. Jepsen, D. Cooke, M. Koch, Las. Photon. Rev. **5**, 124 (2011).
3. D.V. Lavrukhin, et al., IEEE Trans. THz. Sci. Technol., **11**(4), 417 (2021).
4. Д.С. Пономарёв и др., УФН. **194**(1), 2 (2024).
5. A.E. Yachmenev, et al., Prog. Cryst. Growth. Characteriz. Mat. **66** (2), 100485 (2020).
6. D.V. Lavrukhin, A.E. Yachmenev, et al., Sem. Science and Tech. **34**(3), 034005 (2019).
7. D.S. Ponomarev, A. Gorodetsky, A.E. Yachmenev et al., J. of Appl.Phys. **125** (15), 151605 (2019).

**ГЕНЕРАЦИЯ ТГц-ИЗЛУЧЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫМИ ПСЕВДОМОРФНЫМИ  
КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ {InGaAs/GaAs} С ОРИЕНТАЦИЕЙ (100), (110) И (111)А  
И ФОТОПРОВОДЯЩИМИ АНТЕННАМИ НА ИХ ОСНОВЕ**

*Е.А. Климов<sup>1,2</sup>, А.Н. Клочков<sup>3</sup>, П.М. Солянкин<sup>4</sup>, А.С. Синько<sup>4,5</sup>, А.Ю. Павлов<sup>1</sup>,  
Д.В. Лаврухин<sup>1</sup>, \*С.С. Пушкарёв<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени Мокерова РАН  
Россия, 117105, Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр. 5, e-mail: [serp456207@gmail.com](mailto:serp456207@gmail.com)

<sup>2</sup>АО «НПО Орион»,  
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, д. 9

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

<sup>4</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, e-mail: [soluankp@yandex.ru](mailto:soluankp@yandex.ru)

<sup>5</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

**THz EMISSION OF (100), (110) AND (111)A-ORIENTED MULTIPLE PSEUDOMORPHIC  
QUANTUM WELLS {InGaAs/GaAs} AND PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS**

*Е.А. Klimov<sup>1,2</sup>, А.Н. Klochkov<sup>3</sup>, P.M. Solyankin<sup>4</sup>, А.С. Sinko<sup>4,5</sup>, А.Ю. Pavlov<sup>1</sup>,  
D.V. Lavrukhin<sup>1</sup>, \*S.S. Pushkarev*

<sup>1</sup>V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS  
Russia, 117105, Moscow, Nagornyi proezd 7/5, e-mail: [serp456207@gmail.com](mailto:serp456207@gmail.com)

<sup>2</sup>Orion R&P Association, JSC  
Russia, 111538, Moscow, Kosinskaya st. 9

<sup>3</sup>National Research Nuclear University «МЭФИ»  
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

<sup>4</sup>National Research Center «Kurchatov Institute»  
Russia, 123182, Moscow, Academic Kurchatov square, 1, e-mail: [soluankp@yandex.ru](mailto:soluankp@yandex.ru)

<sup>5</sup>Lomonosov Moscow State University  
Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1

In this work we studied the effect of the built-in electric field arising in elastically strained multiple quantum wells {InGaAs/GaAs} with (110) and (111)A crystallographic orientations on the efficiency of THz-generation when pumping the surface of these films, as well as photoconductive antennas based on them, with femtosecond optical laser pulses.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs (100), (110) и (111)А были выращены гетероструктуры, представляющие собой серию из 10 псевдоморфно напряжённых квантовых ям (КЯ) {In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs} с мольной долей индия  $x = 0.1$  или  $0.2$ . Моделирование показало, что в результате пьезоэффекта в этих КЯ образуется встроенное электрическое поле  $\sim 140$  кВ/см при  $x = 0.1$  и  $\sim 260$  кВ/см при  $x = 0.2$ , латеральное в случае гетероструктур на подложке (110) и поперечное в случае



гетероструктур на подложке (111)A; в гетероструктурах на подложках (100) встроенное поле отсутствует. Предсказанное с помощью моделирования уменьшение энергии оптического перехода  $e1-hh1$  в КЯ с встроенным поперечным полем наблюдалось экспериментально с помощью спектроскопии фотолуминесценции [1].

ТГц-импульсы генерировались при облучении фемтосекундным лазером ( $\lambda = 796$  нм, длительность импульса 50–80 фс) непосредственно поверхности выращенных гетероструктур, а также фотопроводящих антенн (ФПА) с топологией «галстук-бабочка» с зазором длиной 5 и 20 мкм, изготовленных на основе гетероструктур  $\{\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}\} \times 10$ . Среди плёнок ТГц-излучение с наибольшей средней мощностью получено от поверхности гетероструктуры  $\{\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}\} \times 10$  на подложке GaAs (110). Среди ФПА наибольшая мощность ТГц-излучения получена от ФПА с зазором длиной 5 мкм на гетероструктурах  $\{\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}\} \times 10$  с ориентациями (110) и (100). Все ФПА на гетероструктурах с разными ориентациями подложек демонстрируют весьма близкие значения мощности ТГц-излучения при длине зазора 5 мкм, а при удлинении зазора до 20 мкм (и соответствующем среднем ослаблении внешнего поля) лидирует ФПА на плёнке со стандартной ориентацией (100). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в гетероструктуре  $\{\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}\} \times 10$ , выращенной на подложке GaAs (110) при стандартной для таких подложек температуре роста, значительного усиления внешнего поля ФПА за счёт встроенного латерального поля не происходит, либо его влияние на величину фототока нивелируется дополнительным рассеянием фотоэлектронов, вызванным повышенной дефектностью такой гетероструктуры.

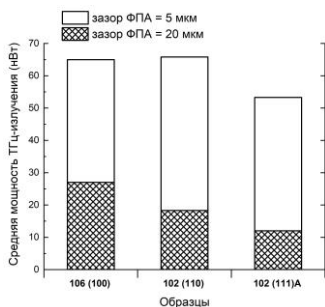


Рис. 1. Средняя мощность ТГц-излучения, измеренная ячейкой Голея, от ФПА

### Литература

1. Е.А. Климов, С.С. Пушкарев, А.Н. Клочков, М.О. Можаяева. Микроэлектроника, **52** (3), 167 (2023).

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-19-00656, <https://rscf.ru/project/22-19-00656/>

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНО-ФОНОННЫХ ЗОННЫХ ДИЗАЙНОВ  
КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ  
В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

**\**R.S. Shtraikh*<sup>1,2</sup>, *P.A. Khabibullin*<sup>1,2,3</sup>, *M.A. Ladugin*<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт  
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, дом 9  
e-mail: [shtraikh.rs@phystech.edu](mailto:shtraikh.rs@phystech.edu)

<sup>2</sup>АО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха,  
Россия, 117342, г. Москва, ул. Введенского, дом 3, корп. 1

<sup>3</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова  
РАН, Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7

**SIMULATION OF RESONANCE-PHONON BAND DESIGNS OF QUANTUM CASCADE  
LASERS FOR GENERATION IN THE TERAHERTZ RANGE**

**\**R.S. Shtraikh*<sup>1,2</sup>, *R.A. Khabibullin*<sup>1,2,3</sup>, *M.A. Ladugin*<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology  
Russia, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutskiy per. 9  
e-mail: [shtraikh.rs@phystech.edu](mailto:shtraikh.rs@phystech.edu)

<sup>2</sup>JSC Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh  
Russia, 117342, Moscow, Vvedenskogo St. 3, Building 1

<sup>3</sup>Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS,  
Russia, 117105, Moscow, Nagorny Proyezd 7

A simulation of the resonant-phonon band design of a quantum cascade laser (QCL) was carried out. The change in the distance between the collector level and the upper laser level, the injection level and the upper laser level with a change in the thickness of the injection barrier is considered. The change in the lifetimes of the collector and injection states with a change in the thickness of the injection barrier is considered.

С помощью бесплатной программы с открытым исходным кодом ErwinJr2 [1] был смоделирован профиль дна зоны проводимости резонансно-фононного зонного дизайна квантово-каскадного лазера [2]. Для оптимального выравнивания уровней в данном дизайне необходимо приложить внешнее электрическое поле, равное 12,2 кВ/см. Расстояние между коллекторным уровнем и верхним лазерным уровнем в следующем каскаде равняется 5,7 мэВ, между инжекционным уровнем и следующим верхним лазерным уровнем – 2,1 мэВ. Время жизни коллекторного состояния составило 478,122 пс, время жизни инжекционного состояния – 24,287 пс.

Минимум расстояния между коллекторным уровнем и следующим верхним лазерным уровнем – 4,1 мэВ, он достигается при толщине барьера 3,2–3,6 нм. Энергия оптического перехода электрона при этом равняется

14,8 мэВ. Депопуляция нижнего лазерного уровня происходит через переход на коллекторный уровень, расстояние между ними – 42,5 мэВ, расстояние между вторым нижним лазерным уровнем и коллекторным – 37,8 мэВ. Время жизни коллекторного состояния составило 35,124 пс.

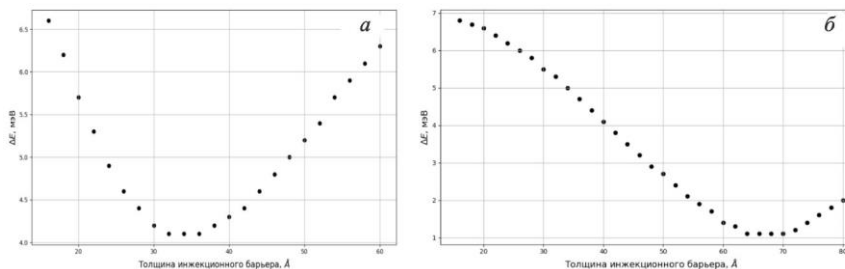


Рис. 1. Зависимость расстояния между коллекторным уровнем (а), инжекционным уровнем (б) и верхним лазерным уровнем от толщины инжекционного барьера

Минимум энергетического расстояния между инжекционным уровнем и следующим верхним лазерным уровнем – 1,1 мэВ (при толщине барьера 6,4–7,0 нм). Энергия оптического перехода электрона при этом равняется 14,2 мэВ. Расстояние между первым нижним лазерным уровнем и коллекторным уровнем – 43,7. Расстояние между вторым уровнем из дублета и коллекторным уровнем – 38,7 мэВ. Время жизни инжекционного состояния составило 25,477 пс.

### Литература

1. ErwinJr2. A software for Quantum Cascade Laser design and simulation [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/ErwinJr2/ErwinJr2> (дата обращения: 10.03.2024).
2. Benjamin S. [et al.]. 3.4-THz quantum cascade laser based on longitudinal-optical-phonon scattering for depopulation // APL. 2003. V. 82(7). P. 1015–1017.

**ОСОБЕННОСТИ ЖИДКОСТНОГО ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ  
МЕЗА-ИЗОЛЯЦИИ В LT-GaAs ПО МАСКЕ РЕЗИСТА,  
СОЗДАННОЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ**

*\*Д.В. Гарабов, Р.Р. Галиев, Д.С. Пономарёв*

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова  
Российской академии наук,  
Россия, 117105, Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр. 5, e-mail: [gardenvit@mail.ru](mailto:gardenvit@mail.ru)

**FEATURES OF WET CHEMICAL ETCHING OF MESA-ISOLATION IN LT-GaAs  
USING A RESIST MASK CREATED BY ELECTRON-BEAM LITHOGRAPHY**

*\*D.V. Garabov, R.R. Galiev, D.S. Ponomarev*

Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS,  
Russia, 11705, Moscow, Nagorny proezd 7, e-mail: [gardenvit@mail.ru](mailto:gardenvit@mail.ru)

The paper presents experimental results of wet chemical etching (WCE) of a SI-GaAs substrate and LT-GaAs layer in  $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$  (1:1:8) solution using a mask of electron resist: a two-layer copolymer/PMMA system and a single-layer PMMA. The pattern was fabricated using electron-beam lithography with beam energies of 50 and 30 keV. It was found that pretreatment of the surface in  $HCl:H_2O$  (1:5) before resist coating improves its adhesion, and treatment in oxygen plasma after development has virtually no effect on the results of WCE. In addition, the possible sensitivity of WCE to exposure dose (beam current density) was noted.

В работе приводятся экспериментальные результаты жидкостного химического травления (ЖХТ) в растворе  $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$  (1:1:8) подложки SI-GaAs и слоя LT-GaAs по маске электронных резистов: двухслойной системы сополимер/ПММА и однослойного ПММА. Рисунок в маске был сформирован методом электронно-лучевой литографии с энергиями 50 и 30 кэВ. Было выявлено, что предобработка поверхности в  $HCl:H_2O$  (1:5) перед нанесением резиста улучшает его адгезию, а обработка в кислородной плазме после проявления практически не влияет на результаты ЖХТ. Кроме того, была отмечена возможная чувствительность ЖХТ к дозе экспонирования (плотности тока луча).

В технологии источников и приёмников ТГц излучения на основе фотопроводящих антенн (ФПА) существует необходимость формирования меза-изоляции в фотопроводящем слое низкотемпературного арсенида галлия (LT-GaAs) для исключения паразитной диффузии носителей между разными элементами ФПА. На практике жидкостное химическое травление

(ЖХТ) имеет особенности, связанные с условиями формирования маски (тип резиста, предобработка поверхности перед его нанесением, доза экспонирования, обработка кислородной плазмой после проявления).

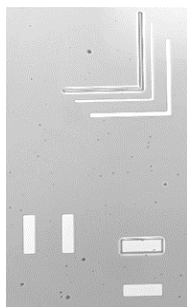


Рис. 1 Травление LT-GaAs по маске сополимер/ПММА с обработкой в O<sub>2</sub>-плазме в течение 12 мин

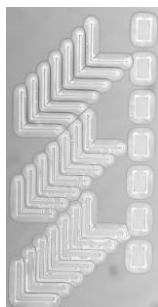


Рис. 2 Травление SI-GaAs по маске ПММА без предобработки



Рис. 3 Травление SI-GaAs по маске ПММА с предобработкой

На рис. 1 показано, что при полном проявлении системы сополимер/ПММА даже при длительной обработке в O<sub>2</sub>-плазме не гарантируется успешное ЖХТ. Также для этой системы резистов было замечено преимущественное отсутствие травления в окнах с шириной от 5 мкм и более, возможно, связанное с увеличением дозы экспонирования из-за эффектов близости. Как следствие, использование электронно-лучевой литографии для формирования масок для ЖХТ может требовать соблюдения определенных условий экспонирования (плотности тока луча, дозы). При использовании одного слоя резиста ПММА 950К было выявлено, что отсутствие или наличие обработки в O<sub>2</sub>-плазме после проявления не влияет на результаты травления. Следовательно, в данном случае поверхность достаточно чистая уже после проявления. Из рис. 2 и 3 можно видеть разницу ЖХТ, связанную с адгезией резиста в зависимости от обработки подложки перед нанесением. В случае резиста ПММА и поверхности GaAs (как для эпитаксиальной подложки SI-GaAs (100), так и для выращенного слоя LT-GaAs) обработка в растворе соляной кислоты (1:5), практически исключает отрыв резиста от подложки на краях окон рисунка проявления [1].

#### Литература

1. Martinez et al., 2010 International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, CS MANTECH (2010).

**ЗАВИСИМОСТЬ АМПЛИТУДЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ИНДИЯ  
ОТ УГЛА ПОВОРОТА ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКИ**

**\*Л.С. Прокопьева<sup>1</sup>, А.Н. Клочков<sup>1</sup>, А.Н. Виниченко<sup>1</sup>, И.С. Васильевский<sup>1</sup>, Н.И. Каргин<sup>1</sup>,  
Е.А. Климов<sup>2</sup>, Г.Б. Галиев<sup>2</sup>, К.А. Кузнецов<sup>3</sup>, П.М. Ковалева<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, дом 33, e-mail: [orchidia@bk.ru](mailto:orchidia@bk.ru)

<sup>2</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники  
имени В.Г. Мокерова РАН, Россия, 117105, г. Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет  
Россия, 119992, Москва, Ленинские горы, 1

**DEPENDENCE OF TERAHERTZ RADIATION AMPLITUDE OF INDIUM ARSENIDE  
SEMICONDUCTOR FILMS ON THE ANGLE OF ROTATION  
OF THE LASER PUMP POLARIZATION PLANE**

**\*L.S. Prokopyeva<sup>1</sup>, A.N. Klochkov<sup>1</sup>, A.N. Vinichenko<sup>1</sup>, I.S. Vasilievsky<sup>1</sup>, N.I. Kargin<sup>1</sup>,  
E.A. Klimov<sup>2</sup>, G.B. Galiev<sup>2</sup>, K.A. Kuznetsov<sup>3</sup>, P.M. Kovaleva<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> National Research Nuclear University «MEPhI»,

115409, Russia, Moscow, Kashirskoye Shosse, 33, e-mail: [orchidia@bk.ru](mailto:orchidia@bk.ru)

<sup>2</sup>Institute of ultra-high-frequency semiconductor electronics named after V.G. Mokerov RAS  
Russia, 117105, Moscow, Nagorny proezd, 7, p. 5

<sup>3</sup>Moscow State University named after M.V. Lomonosov. M.V. Lomonosov Moscow  
State University, Faculty of Physics, Russia, 119992, Moscow, Russia  
Russia, 119992, Moscow, Leninskie Gory, 1

In this work, terahertz generation from the surface of two different heterostructures based on InAs and InGaAs films is investigated. The studied samples were grown by molecular beam epitaxy, sample 708 at high temperatures and 985 at low temperatures. Sample 708 (Table 1) is an InAs epitaxial film grown on a C-oriented Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sapphire substrate. Sample 985 was a 1.2 μm thick In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As (x ≈ 0.5) layer grown on a semi-insulating InP (411)A substrate. The THz radiation intensity was measured as a function of the sample rotation around the axis of incidence of the excitation laser radiation. A periodic dependence of the signal on the rotation angle φ was established. The dependence for sample 708 has 6 peaks with maxima observed every 60°. For sample 985, the dependence has 2 peaks.

Ультракороткие электромагнитные импульсы терагерцового диапазона частот рождаются при взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов с поверхностью различных материалов, в том числе полупроводников.

Изучение механизмов взаимодействия ультракоротких оптических импульсов с материей позволяет разрабатывать более эффективные методы генерации ТГц волн. В работе исследуется терагерцовая генерация от поверхности двух различных гетероструктур на основе InAs и InGaAs. Исследуемые образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Образец 708 представляет собой эпитаксиальную пленку InAs толщиной 110 нм, выращенную на подложке сапфира  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Образец 985 представлял собой слой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x \approx 0.5$ ) толщиной 1,2 мкм, выращенный на полупроводящей подложке InP с ориентацией (411)A при пониженной температуре роста 200 °C.

Измерения генерации ТГц излучения производились при нормальном падении импульсов накачки эрбиевого лазера (1.5 мкм) в геометрии на просвет в зависимости от поворота образца вокруг оси падения возбуждающего лазерного излучения. Установлена периодическая зависимость сигнала от угла поворота  $\varphi$ . Зависимость для образца 708 имеет 6 пиков при повороте на 360°, максимумы наблюдаются каждые 60° (см. рис. 1). Для образца 985 зависимость имеет 2 пика (см. рис. 2).

В докладе обсуждаются возможные механизмы угловой зависимости амплитуды ТГц волн от поворота образца. Измерения с помощью рентгеновской дифракции показали, что различная угловая зависимость объясняется различной ориентацией и симметрией кристаллической структуры пленок по отношению к оси поворота.

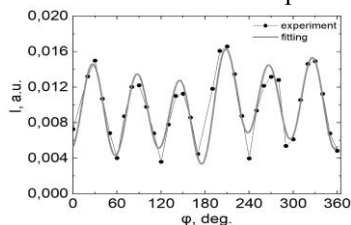


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения от азимутального угла поворота образца InAs

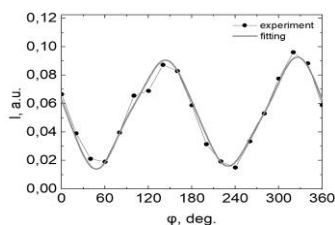


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения от азимутального угла поворота образца InGaAs

Исследование пленок InAs/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение №075-15-2021-1352), исследование InGaAs/InP выполнялось в рамках гранта РНФ №22-19-00656.

#### Литература

1. A. Klochkov et al., Applied Surface Science **619**, 156722 (2023).
2. G. V. Galiev et al., Semiconductors **51**, 310–317 (2017).

**ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХСВЕТОВОЙ РАЗРЯДКЕ  
ПЛОСКОГО ВАКУУМНОГО ФОТОДИОДА**

*\*С.А. Романов<sup>1,2</sup>, А.А. Ушаков<sup>1</sup>, К.А. Мамаева<sup>1</sup>, Т.В. Долматов<sup>1</sup>, П.А. Чижов<sup>1</sup>,  
В.М. Шевлюга<sup>1</sup>, В.В. Букин<sup>1</sup>, С.В. Гарнов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук  
Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, дом 38, e-mail: [romanovsa2002@mail.ru](mailto:romanovsa2002@mail.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия  
г. Москва, Каширское шоссе, дом 31

**GENERATION OF TERAHERTZ RADIATION AT SUPERLUMINAL DISCHARGE  
OF A FLAT VACUUM PHOTODIODE**

*\*S.A. Romanov<sup>1,2</sup>, A.A. Ushakov<sup>1</sup>, K.A. Mamaeva<sup>1</sup>, T.V. Dolmatov<sup>1</sup>, P.A. Chizhov<sup>1</sup>,  
V.M. Shevlyuga<sup>1</sup>, V.V. Bukin<sup>1</sup>, S.V. Garnov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
119991, Russia, Moscow, Vavilova 38, e-mail: [romanovsa2002@mail.ru](mailto:romanovsa2002@mail.ru)

<sup>2</sup>National research nuclear university MEPHI (Moscow engineering physics institute)  
Russia, Moscow, Kashirskoye 31

The results of measurements of electromagnetic radiation (EMR) energy in the THz range during superluminal discharge of a vacuum photodiode by femto-second laser pulses at different values of the fraction of emitted charges from the cathode surface and different values of the voltage applied between the photodiode liners are presented.

ТГц излучение нашло огромное применение как в экспериментальных, так и в теоретических задачах. Ранее было показано, что при наклонном падении рентгеновского излучения на поверхность мишени образуется электронная эмиссия, формирующая ЭМИ [1]. В работах [2–3] предложена методика по усилению излучения при помощи внешнего поля, прикладывая которое энергия имитируемых с поверхности катода электронов резко возрастает, вследствие чего энергия ЭМИ увеличивается. Подобный метод продемонстрировал эффективную генерацию в СВЧ диапазоне. Уменьшение времени торможения электронов позволяет генерировать импульсы в более высокочастотной области, в том числе и ТГц. Таким образом, меняя конфигурацию фотодиода: расстояние между обкладками, величину внешнего поля, можно получить ЭМИ в ТГц диапазоне.

Целью работы является исследование способов генерации ТГц излучения при сверхсветовой разрядке вакуумного фотодиода фемтосекундными лазерными импульсами.

В роли источника ТГц излучения используется плоский вакуумный фотодиод, конструкция которого представляет собой анод, изготовленный из



пластинки, нержавеющей стали и, разделенный от него слоем диэлектрического изолятора, катод, представляющий собой сурьмяно-цезиевое покрытие ( $Cs_3Sb$ ), нанесенное на поверхность входного окна, изготовленного из сапфира. Для формирования электронной эмиссии под углом на фотокатод направляется фемтосекундное лазерное излучение (вторая гармоника титан-сапфирового лазера, центральная длина волны 400 нм, длительность импульсов до 50 фс, энергии импульсов до 1 мДж). Под действием лазерного излучения возникает электронная эмиссия, которая при воздействии внешнего электрического поля (50–100 кВ/см) ускоряется и тормозит в тонком слое нержавеющей анода. Регистрация излучения производится с помощью детектора Голея с использованием методики синхронного детектирования (рис. 2).

В работе проводится исследование зависимости импульсов ТГц излучения от напряженности прикатодного поля и доли эмитируемого заряда с поверхности.

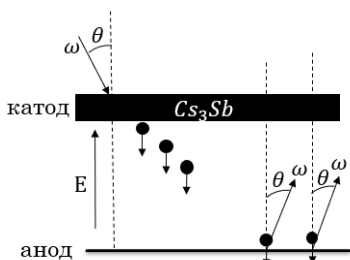


Рис. 1. Схема фотодиода

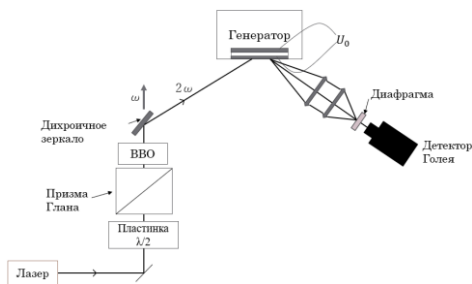


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

### Литература

1. Carron N.J. and Longmire C.L., Transactions on Nuclear Science. V.23 (6). P. 1897–1902 (1976).
2. Лазарев Ю.Н. и Петров П.В., Письма в ЖЭТФ. 1994 V.60 (9). P. 625–628 (1994).
3. Brendel V. M., Bukin V. V. and Garnov S. V., Physics of Wave Phenomena. V.22 (4). P. 219–222, (2014).

**КОГЕРЕНТНОЕ УСИЛЕНИЕ ОБРАТНОГО ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ  
В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

*\*Д.В. Гавриленко<sup>1</sup>, А.А. Тищенко<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, Москва, Каширское шоссе, дом 31

<sup>2</sup> Белгородский национальный исследовательский университет  
Россия, Белгород, ул. Победы, 85

**COHERENT ENHANCEMENT OF THOMSON BACKSCATTERING  
IN THE THz RANGE**

*\*D.V. Gavrilenko<sup>1</sup>, A.A. Tishchenko<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, Moscow, Kashira Hwy, 31

<sup>2</sup> Belgorod National Research University, Russia, Belgorod, st. Pobeda, 85

In recent decades, terahertz (THz) radiation generation technology has become a focal point of research due to its promising applications such as plasma diagnostics, high-resolution radar, biomedical research, and high-speed communication [1-2]. One method of generating such radiation is inverse Compton scattering of photons with lower frequency on relativistic electrons [3].

In this study, we develop a theory that accounts for coherent effects when two beams collide, oriented at arbitrary angles relative to the propagation trajectory. We calculate the coherent luminosity for the case when both beams are described by Gaussians with arbitrary tilt, and demonstrate the possibility of forming a cone of Cherenkov radiation in a vacuum, which results in a considerable increase of the intensity in the THz frequency domain. The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FZWG-2020-0032 (2019-1569).

В последние десятилетия технология генерации терагерцового (ТГц) излучения стала активным объектом исследований благодаря своим перспективным применениям, таким как диагностика плазмы, высокоразрешающие радары, биомедицинские исследования и высокоскоростная связь [1-2]. Одним из методов генерации такого излучения является обратное томсоновское рассеяние фотонов с более низкой частотой на релятивистских электронах [3].

Чтобы получить большой поток фотонов на таких источниках, можно увеличить населенности электронных и лазерных пучков, однако это приведет к многочастичному рассеянию и нелинейным эффектам, что существенно уширит спектр. Другим способом является оптимизация геометрии

процесса с точки зрения числа отдельных столкновений. В работе [4] была посчитана светимость комптоновского рассеяния для произвольного угла столкновения и произвольных углов наклона пучков. Было показано, что правильным поворотов пучков можно добиться значительного роста числа взаимодействий, а значит и рассеянных фотонов, и что такая схема отвечает «stab-crossing» режиму, успешно применяющемуся в физике коллайдеров. Однако, в цитируемой статье не были рассмотрены когерентные эффекты, которые потенциально могли бы привести к еще большему, квадратичному по населенности пучков, росту интенсивности.

Тем не менее, существуют когерентные процессы и с протяженными источниками, например, излучение Вавилова-Черенкова. Заряд движется по непрерывной траектории; характерных размеров, которые ограничивались бы длиной волны излучения, нет, а угловое распределение зависит от частоты только из-за дисперсии диэлектрической проницаемости. Это возможно из-за того, что скорость излучателя больше фазовой скорости света в среде. Подобные условия можно создать и в вакууме. Поворачивая определенным образом достаточно вытянутые пучки, можно добиться, чтобы область их пересечения двигалась быстрее скорости света.

В этой работе мы строим теорию терагерцового излучения на основе явления обратного томсоновского рассеяния. Теория учитывает когерентные эффекты при столкновении двух пучков, повернутых на произвольные углы относительно траектории распространения. С помощью этой теории мы рассчитываем когерентную светимость для случая, когда оба пучка описываются гауссианами с произвольным наклоном, и показываем возможность образования конуса черенковского излучения в вакууме, что значительно увеличивает интенсивность источника в ТГц диапазоне частот. Исследование выполнено при поддержке Министерством науки и высшего образования РФ, проект FZWG-2020-0032 (2019-1569).

#### Литература

1. H.A. Hafez et al., Intense terahertz radiation and their applications, *J. Opt.* **18**, 093004 (2016).
2. P. Hyldegaard and M. Persson, *J. Phys. Condens. Matter* **12**, L13 (2000).
3. K. Ta Phuoc et al., All-optical Compton gamma-ray source, *Nature Photonics* **6**, 308–311 (2012).
4. A. P. Potylitsyn, D. V. Gavrilenko, M. N. Strikhanov, and A. A. Tishchenko, *Phys. Rev. Accel. Beams* **26**, 040701 (2023).

**СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА МОЩНЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ИНТЕРВАЛЕ ЧАСТОТ 0.07–1.2 ТГц**

*\*С.Л. Синицкий<sup>1,2</sup>, А.В. Аржанников<sup>1,2</sup>, С.А. Кузнецов<sup>1,2</sup>, П.В. Калинин<sup>1,2</sup>, М.А. Макаров<sup>1</sup>,  
Д.А. Самцов<sup>1</sup>, Е.С. Сандалов<sup>1,2</sup>, В.Д. Степанов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия, 630090,  
г. Новосибирск проспект Академика Лаврентьева, д. 11, e-mail: [S.L.Sinitsky@inp.nsk.su](mailto:S.L.Sinitsky@inp.nsk.su)

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д.2, e-mail: [s.sinitskii@gs.nsu.ru](mailto:s.sinitskii@gs.nsu.ru)

**SPECTRAL DIAGNOSTICS OF HIGH-POWER RADIATION FLUXES IN THE  
FREQUENCY RANGE OF 0.07-1.2 THz**

*\*S.L. Sinitsky<sup>1,2</sup>, A.V. Arzhannikov<sup>1,2</sup>, S.A. Kuznetsov<sup>1,2</sup>, P.V. Kalinin<sup>1,2</sup>, M.A. Makarov<sup>1</sup>,  
D.A. Samtsov<sup>1</sup>, E.S. Sandalov<sup>1,2</sup>, V.D. Stepanov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk  
Academician Lavrentiev Avenue, 11, e-mail: [S.L.Sinitsky@inp.nsk.su](mailto:S.L.Sinitsky@inp.nsk.su)

<sup>2</sup>Novosibirsk State University,  
Russia, 630090, Novosibirsk, st. Pirogova, 2, e-mail: [s.sinitskii@g.nsu.ru](mailto:s.sinitskii@g.nsu.ru)

One of the scientific tasks of the Budker Institute of Nuclear Physics is the investigation of methods for generating terahertz radiation and the creation of the radiation sources in the mm- and submm- ranges on its basis. A characteristic feature of such sources based on relativistic electron beams is a unique combination of the radiation parameters: the frequency range, from 0.07 to 1.2 THz, few tens of MW power level and the pulse duration up to few microseconds. In this connection, the development of an appropriate diagnostic complex is very relevant. In the report, we present the description of the complex of frequency-selective diagnostics in the range of 0.07–1.2 THz and the results of its application for recording the parameters of high-power radiation fluxes.

The work was funded in a part by the Russian Science Foundation (grant No. 23-1900370).

В докладе представлены результаты по созданию комплекса частотно-селективных диагностик для регистрации параметров потоков излучения в интервале частот от 0.07 до 1.2 ТГц с уровнем мощности более 10 МВт. Регистрация спектральной плотности мощности излучения в локальных областях частотного интервала 0.1–0.5 ТГц обеспечивается полосовыми фильтрами, созданными на основе субволновых частотно-селективных структур, и полупроводниковыми детекторами на барьере Шотки [1]. Также имеются гетеродинные системы, обеспечивающие детальный спектральный анализ в окрестности частот 0.075, 0.14 и 0.3 ТГц. Регистрация сигналов на выходе

смесителей этих гетеродинов проводится с использованием высокоскоростных осциллографов с рабочей полосой частот до 8 ГГц.

Для спектральных измерений мощных потоков излучения в области частот свыше 0.5 ТГц используется двухканальный криогенный (гелиевые температуры) болометр с временным разрешением 1 нс фирмы Scontel, обладающий плавной зависимостью чувствительности в широком интервале частот от 0.1 до 3 ТГц. Частотная селективность обеспечивается установкой на его двух входах полосовых фильтров также на основе субволновых частотно-селективных структур для пропускания излучения в выбранной частотной области (сейчас реализованы фильтры на окрестности частот 0.6, 0.8 и 1.2 ТГц с относительной шириной полосы пропускания 15–20 %). Калибровка абсолютной чувствительности каналов регистрации проводится на специальном стенде. В настоящее время указанные диагностики используются для анализа спектрального состава мегаваттных потоков мм- и субмм-излучения из мазера на свободных электронах на установке «ЭЛМИ» [2, 3] и пучково-плазменного генератора «ГОЛ-ПЭТ» [4] в ИЯФ СО РАН (Новосибирск).

Работы по созданию и развитию диагностического комплекса были выполнены при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-1900370).

#### Литература

1. Arzhannikov A.V., Ivanov I.A., Kuznetsov S.A. et al., «Eight-Channel Polychromator for Spectral Measurements in the Frequency Band of 0.1-0.6 THz», 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Souza, the Altai Republic, Russia, 2021, pp. 101-105, doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507604.
2. Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Kalinin P.V. et al. «Powerful two-stage THz-range FEL based on intense parallel sheet beams: Design, simulations and recent results», International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, 2018-September, № 8510144, 2018. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510144.
3. Сандалов Е. С., Сеницкий С.Л., Аржанников А.В. и др. Диагностика миллиметрового излучения в пучково-плазменных генераторах и ЛСЭ терагерцового генератора // Диагностика высокотемпературной плазмы. – 2023. – С. 278–280.
4. Arzhannikov A.V., Sinitzky S.L., Samtsov D.A. et al. “Energy Content and Spectral Composition of a 5- $\mu$ s-Long Flux of Submillimeter Radiation Generated in Plasma during REB Relaxation.” Plasma Phys. Rep. 48, 1080–1086 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063780X22600773>.

**ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЛСЭ-ГЕНЕРАТОРА СУБ-ГВТ ПОТОКА  
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА  
ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ**

*\*E.S. Sandalov<sup>1</sup>, S.L. Sinitskiy<sup>1</sup>, A.V. Arzhannikov<sup>1</sup>, I.N. Meshcheryakov<sup>1</sup>,  
D.I. Skovorodin<sup>1</sup>, D.A. Nikiforov<sup>1</sup>, V.A. Pavlyuchenko<sup>1</sup>, D.A. Samtsov<sup>1</sup>, P.V. Logachev<sup>1</sup>,  
P.A. Bak<sup>1</sup>, N.S. Ginzburg<sup>1</sup>, N.Yu. Peskov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, г. Новосибирск проспект Академика Лаврентьева, д. 11  
e-mail: [E.S.Sandalov@inp.nsk.su](mailto:E.S.Sandalov@inp.nsk.su)

**ELECTRON-OPTICAL SYSTEM OF FEL-GENERATOR  
OF SUB-GW TERAHERZ RADIATION FLUX DRIVEN BY AN ELECTRON BEAM  
OF A LINEAR INDUCTION ACCELERATOR**

*\*E.S. Sandalov<sup>1</sup>, S.L. Sinitskiy<sup>1</sup>, A.V. Arzhannikov<sup>1</sup>, I.N. Meshcheryakov<sup>1</sup>,  
D.I. Skovorodin<sup>1</sup>, D.A. Nikiforov<sup>1</sup>, V.A. Pavlyuchenko<sup>1</sup>, D.A. Samtsov<sup>1</sup>, P.V. Logachev<sup>1</sup>,  
P.A. Bak<sup>1</sup>, N.S. Ginzburg<sup>1</sup>, N.Yu. Peskov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk  
Academician Lavrentiev Avenue, 11, e-mail: [E.S.Sandalov@inp.nsk.su](mailto:E.S.Sandalov@inp.nsk.su)

One of the scientific problems being solved at the BINP SB RAS is the creation of a free electron laser driven by a high-current, high-brightness relativistic electron beam generated by the linear induction accelerator «LIU» (5–10 MeV, 1–2 kA) currently under construction. The purpose of this work is to experimentally demonstrate the possibility of obtaining sub-gigawatt power level and energy content of up to ~100 J in a radiation pulse generated by this sub-THz FEL. In the report, we present the recent results of modeling an electro-optical system of such a FEL, which allows, at the first experimental stage, to ensure the formation of a radiation flux with a characteristic frequency of 300 GHz, a duration of 100 ns and a power level of 0.1–0.5 GW.

В настоящее время несмотря на доступность различного рода источников электромагнитного излучения малой и средней мощности в широком интервале длин волн [1], по-прежнему остается актуальной задача создания длинноимпульсных (0.1–1 мкс) источников когерентного электромагнитного излучения с суб-ГВт уровнем мощности, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, что представляет большой интерес для различных научных исследований и технических приложений.

В связи с этим в ИЯФ СО РАН (ИЯФ) совместно с Институтом прикладной физики РАН (ИПФ) разрабатываются и исследуются различные перспективные схемы генерации импульсов излучения с такими параметрами [2–3]. На основе одной из этих схем нами предложен и в настоящее время

реализуется проект субТГц лазера на свободных электронах (ЛСЭ) [4–5], в котором в качестве драйвера планируется использовать электронный пучок ( $E_e = 5\text{--}10$  МэВ,  $I_b = 1\text{--}2$  кА, нормализованный эмиттанс  $\sim 500\text{--}1000$  п·мм·мрад), генерируемый на новом линейном индукционном ускорителе «ЛИУ» [6–7]. В рамках доклада будут представлены актуальные результаты моделирования электронно-оптической системы ЛСЭ, позволяющей на первом этапе экспериментов сформировать и транспортировать в устойчивом равновесии электронный пучок с диаметром  $\sim 10$  мм, током 2 кА и энергией 5 МэВ в электродинамической системе ЛСЭ-генератора в условиях ондуляторного магнитного поля с периодом 10 см. Взаимодействие такого пучка с волной в таком ЛСЭ-генераторе должно обеспечить формирование потока излучения с характерной частотой 300 ГГц, длительностью 100 нс и уровнем мощности 0.1–0.5 ГВт.

#### Литература

1. Lee Y. Principles of Terahertz Science and Technology (Lecture Notes in Physics). New York: Springer, 2009. 352 p.
2. Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Kalinin P.V. et al. «Powerful two-stage THz-range FEL based on intense parallel sheet beams: Design, simulations and recent results», International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, 2018-September, № 8510144, 2018. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510144.
3. Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Samtsov D.A. et al. «Energy Content and Spectral Composition of a 5- $\mu$ s-Long Flux of Submillimeter Radiation Generated in Plasma during REB Relaxation». Plasma Phys. Rep. 48, 1080–1086 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063780X22600773>.
4. E.S. Sandalov, S.L. Sinitsky, A.V. Arzhannikov et al., «Magnetic system of a subgigawatt terahertz FEL generator based on a kiloampere beam of relativistic electrons», Bull. of Univers. Radiophysics. Volume LXVI, No. 7–8, p. 538-554, 2023.
5. D.A. Nikiforov, A.V. Petrenko, S.L. Sinitsky et al., «Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source», Journal of Instrumentation (JINST), vol.16, P11024, 2021, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/P11024>.
6. E.S. Sandalov, S.L. Sinitsky, A.V. Burdakov et al., «Electrodynamic System of the Linear Induction Accelerator Module», IEEE TPS, vol.49, no.2, pp. 718–728, 2021.
7. E.S. Sandalov et al. Kiloampere Electron Beam of a Linear Induction Accelerator as a Driver for a Submillimeter Free Electron Laser. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 87, 573–579 (2023). <https://doi.org/10.3103/S1062873822701763>.

## ТГц ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЧАСТИЦ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

\**А.А. Плеханов, А.Э. Акмалов, Г.Е. Котковский, Ю.А. Кузищин, И.Л. Мартынов, Е.В. Осипов, А.А. Чистяков*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: [AAPlekhanov@mephi.ru](mailto:AAPlekhanov@mephi.ru)

## THZ VISUALIZATION OF PARTICLES OF ORGANIC SUBSTANCES

\**A.A. Plekhanov, A.E. Akmalov, G.E. Kotkovskii, Yu.A. Kuzishchin, I.L. Martynov, E.V. Osipov, A.A. Chistyakov*

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: [AAPlekhanov@mephi.ru](mailto:AAPlekhanov@mephi.ru)

The THz radiovision method was used to study organic particles with sizes up to 600  $\mu\text{m}$ .

В работе исследовалось детектирование отдельных частиц органических веществ (1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана – RDX и пентаэритрит-тетранитрата - PETN) с размерами ~100-600 мкм методом [1] терагерцового (ТГц) радиовидения.

В качестве источника терагерцового излучения использовались фото-проводящая антенна (ФПА). Для получения ТГц импульсов с помощью ФПА излучение титан-сапфирового фемтосекундного лазера со средней мощностью 2,3 Вт и длиной волны 800 нм фокусировалось на поверхности ФПА. Длительность лазерного импульса составляла 60 фс, частота следования импульсов 80 МГц. ТГц спектр излучения фотопроводящей антенны имел наибольшую мощность в диапазоне частот 0,5–1,1 ТГц, который практически полностью совпадает с полосой поглощения RDX [2]. В качестве ТГц детектора использовалась микроболометрическая видеокамера.

Детектирование отдельных частиц RDX и PETN проводилось в оптической схеме «на пропускание» и в оптической схеме «на отражение».

Экспериментально показано, что для частиц RDX и PETN с размерами 300–600 мкм в области максимума полосы поглощения RDX (~0,8 ТГц) контраст ТГц изображений практически одинаковый, несмотря на то, что показатели поглощения этих веществ отличаются на порядок, однако для частиц с размерами <300 мкм разница в контрасте растёт с уменьшением их размера.

В работе также проводилось математическое моделирование [3] для зависимости сечения экстинкции исследуемых частиц от их размера. Согласно полученным результатам, для частиц RDX и PETN с размерами 300–



600 мкм сечения экстинкции близки, что является причиной практически одинакового контраста изображений. При этом для частиц с размером <300 мкм сечения отличаются, что приводит к увеличению контраста для частиц RDX по сравнению с PETN.

#### **Литература**

1. A.A. Plekhanov, et al. //Optical Engineering, Vol. 62, №. 3, pp. 034109-1-034109-13, (2023).
2. А.А. Плеханов, и др. //Письма в ЖТФ, том 50, выпуск 7, стр. 35-38, (2024).
3. Шифрин К.С. //М.; Л.: Гос. изд-во технико-теоретической лит., 1951. 288 с.

**ВЛИЯНИЕ ФОНОН-ИНТЕРФЕЙСНОГО РАССЕЯНИЯ  
НА ПРОДОЛЬНОЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СЛОИСТЫХ ПЛЕНОК Si/Ge(111)**

*А.Л. Хомен<sup>1</sup>, И.В. Сафронов<sup>2</sup>, А.Б. Филонов<sup>1</sup>, \*Д.Б. Мигас<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220089, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 6, e-mail: [migas@bsuir.by](mailto:migas@bsuir.by)

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
Беларусь, 220030, г. Минск, пр. Независимости, 4

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

**EFFECT OF PHONON-INTERFACE SCATTERING ON THE IN-PLANE THERMAL  
CONDUCTIVITY IN LAYERED Si/Ge(111) THIN FILMS**

*A.L. Khamets<sup>1</sup>, I.V. Safronov<sup>2</sup>, A.B. Filonov<sup>1</sup>, \*D.B. Migas<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Belarus, 220089, Minsk, st.Petrusya Brovki, 6, e-mail: [migas@bsuir.by](mailto:migas@bsuir.by)

<sup>2</sup>Belarusian State University  
Belarus, 220030, Minsk, Nezavisinosti av., 4

<sup>3</sup>National Nuclear Research University «MEPhI»  
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

Simulation of the in-plane phonon thermal conductivity in layered Si/Ge films was carried out using the non-equilibrium molecular dynamics method. It was found that for layered Si/Ge(111) films, an additional decrease in the in-plane thermal conductivity (by about 2–3 W/(m · K) at 300 K) occurred when the double atomic layer at the interface had alternating Si and Ge atoms. In this case, the intense phonon-interface scattering balanced more thermally conductive Si layers resulting in the thermal conductivity of the layered Si/Ge(111) films to be comparable to that of the homogenous Ge film.

Известно, что, применяя структуры пониженной размерности можно существенно влиять как на электронные свойства, так и на тепловой транспорт, значительно повышая при этом эффективность термоэлектрических материалов. Целью данной работы являлось теоретическое исследование роли фонов-интерфейсного рассеяния на продольную фоновую теплопроводность в слоистых пленках Si/Ge(111) с различными границами раздела.

В работе рассматривались симметричные слоистые пленки Si/Ge(111) с резкими границами раздела в сравнении с гомогенными пленками Ge эквивалентной толщины, а также с объемной сверхрешеткой (массивом) Si/Ge. Расчет теплопроводности проводился методом неравновесной молекулярной динамики при 300 К.

Выявлено, что когда двойной атомный слой на границе раздела состоит из чередующихся Si и Ge атомов (вариант № 1), то продольная теплопроводность оказалась ниже на  $\sim 2\text{--}3$  Вт/(м·К) при 300 К (рис. 1а) по сравнению со случаем без чередования (вариант № 2).

Анализ полных и парциальных плотностей колебательных состояний (ПКС) на примере массива Si/Ge (рис. 1б–д) показал, что для варианта границ раздела №1 существенно меняется форма фоновых спектров при частотах свыше 9 ТГц. Большое перекрытие спектров объемных и интерфейсных атомов говорит о большем числе фононов, способных пересекать границы раздела. При этом, появление пика в окрестности 12 ТГц для Si/Ge границ раздела приводит к несоответствию фоновых спектров (рис. 1в), что может свидетельствовать о более сильном фоновом-интерфейсном рассеянии [1, 2] для варианта границ раздела № 1 по сравнению с № 2 (рис. 1д).

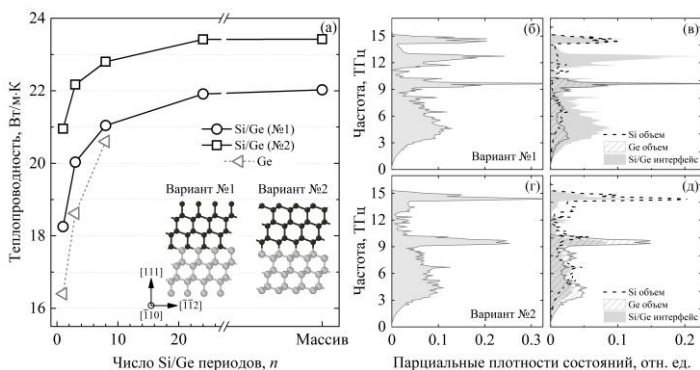


Рис. 1. Продольная теплопроводность вдоль  $[110]$  направления от числа периодов при 300 К для пленок Si/Ge(111) и Ge(111) – (а), полные ПКС – (б), (г), и парциальные ПКС для вариантов границ раздела №1 и №2 соответственно – (в), (д)

Установлено, что интенсивность фоновом-интерфейсного рассеяния в слоистых пленках Si/Ge(111) зависит от типа границы раздела. В случае, когда двойной слой на границе раздела состоит из чередующихся Si и Ge атомов, фоновом-интерфейсное рассеяние частично компенсирует вклад более теплопроводящих Si слоев при большом числе Si/Ge периодов.

### Литература

1. A.L. Khamets et al., JAP **62**, 1 (2023).
2. M. Hu et al., Phys. Rev. B. **84**, 085442 (2011).

**КРИТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАНОСТРУКТУР СВЕРХПРОВОДНИК/ГРАФЕН**

*\*В.Н. Кушнир<sup>1,2</sup>, С.Л. Прищепа<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, улица П. Бровки, 6, e-mail: [vnkushnir@gmail.com](mailto:vnkushnir@gmail.com)

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

Беларусь, 220030, г. Минск, Проспект Независимости, 4

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

**THE CRITICAL TEMPERATURES  
OF THE SUPERCONDUCTOR/GRAPHENE NANOSTRUCTURES**

*\*V.N. Kushnir<sup>1,2</sup>, S.L. Prischepa<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and RadioElectronics  
Belarus, 220013 Minsk, P. Brovka street 6

<sup>2</sup>Belarusian State University

Belarus, 220030 Minsk, Nezavisimosti prospect 4, e-mail: [vnkushnir@gmail.com](mailto:vnkushnir@gmail.com)

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe highway 31

We propose a method for the superconductivity stimulation of the thin film (Nb) by modifying its phonon spectrum by a layer of graphene in contact with a film. The effectiveness of the method is theoretically justified and confirmed by the observation of an increase in the critical temperature of the film.

Современная сверхпроводниковая наноэлектроника и спинтроника требует использования сверхпроводящих пленок нанометровых толщин, обладающих устойчивыми характеристиками, в частности, критической температурой  $T_c$  [1]. Удержание значения критической температуры при вариациях толщины,  $d$ , сверхпроводящих пленок представляет собой сложную задачу ввиду быстрого убывания величины  $T_c$  при уменьшении  $d$  в области малых  $d$  [2]. С другой стороны, чувствительность данной характеристики при толщине пленки порядка нескольких нанометров оказывается удобным средством при исследовании фундаментальных проблем сверхпроводимости.

Задача, решаемая в представленной работе, относится к проблеме разработки методов модификации фононного спектра сверхпроводящей пленки с целью увеличения ее критической температуры. Постановка данной задачи вполне обоснована, поскольку критическая температура есть функционал структурной функции Элиашберга, выраженной через спектральную функцию фононной подсистемы сверхпроводника,  $F(\omega)$ , и спектральную функцию электрон-фононного взаимодействия,  $\alpha^2(\omega)$  [3, 4]. Более

того, задача оказывается корректной, если для сверхпроводящего материала, а таковым является Nb, в широком диапазоне частот можно полагать  $\alpha^2(\omega) \approx \text{const}$ .

Проблема модификации, или, точнее, «смягчения» фононного спектра решалась ранее (полный обзор методов приведен в [5]), в частности, путем покрытия сверхпроводящей пленки легкими атомами. Этот метод оказался недостаточно контролируемым, и не эффективным. В данной работе рассматривается метод, состоящий в формировании на поверхности пленки Nb двумерной или квазидвумерной кристаллической решетки из легких атомов, обладающей необходимым свойством – фиксированным фононным спектром. В качестве таковой взят графен (G) – его эффект определяется тем, что частотный спектр колебаний G-пленки в ортогональном ее плоскости направлении существенно перекрывается с частотным спектром акустических волн в ниобии. Еще одна компонента структуры – она имеет нетривиальное значение для формирования фононного спектра – диэлектрическая прослойка (I) из окислов Nb; ее толщина – один или два атомарных слоя. Данная прослойка хаотически распределенных относительно тяжелых молекул играет двойную роль, демпфируя высокочастотные волны из графена и позволяя распространяться, хотя и ослабленным, длинным волнам. В результате, вместо исходной структуры Nb/I/G можем рассматривать модельную структуру  $\text{Nb}\alpha\text{G}_r$ , со слабой связью  $\alpha$  между слоями и с редуцированной спектральной характеристикой графена. Анализ уравнений динамики такой кристаллической структуры показывает, что модификация фононного спектра решетки происходит так, что интервал сгущения частот находится (a) в области малых частот, (b) содержит окрестность наиболее эффективного воздействия на спектр (см. [5] и ссылки в [5]). В итоге эффективная константа электрон-фононного взаимодействия возрастает, что влечет за собой увеличение критической температуры пленки ниобия. Кратко представленный здесь теоретический анализ вполне согласуется с экспериментом [5].

#### Литература

1. L.R. Tagirov, M.Yu. Kupriyanov, V.N. Kushnir, A. Sidorenko, Functional nanostructures and metamaterials for superconducting spintronics, Springer series NanoScience and Technology; ed.: Anatolie Sidorenko. Springer Int. Pub. AG, part of Springer Nature. 2018. P. 31.
2. В.Н. Кушнир, Сверхпроводимость слоистых структур. Мн.: БНТУ, 234 с. (2010).
3. Г.М. Элиашберг, ЖЭТФ **38**, 966 (1960).
4. W.L. McMillan, Phys. Rev. **167** (1968) 331.
5. S.L. Prischepa, V.N. Kushnir, J. Phys.: Condens. Matter **35** 313003 (2023).

**ИНТЕРФЕЙСНЫЕ ЗАРЯДОВЫЕ СОСТОЯНИЯ  
В ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ ОСУНТ/КРЕМНИЙ**

***\*Е.А. Дронина<sup>1</sup>, Н.Г. Ковальчук<sup>1</sup>, А.Л. Данилюк<sup>1</sup>, С.Л. Прищеп<sup>1,2</sup>***

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail: [lizadronina@yandex.by](mailto:lizadronina@yandex.by)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

**INTERFACE CHARGE STATES IN SWCNT/SILICON HETEROJUNCTIONS**

***\*L.A. Dronina<sup>1</sup>, N.G. Kovalchuk<sup>1</sup>, A.L. Danilyuk<sup>1</sup>, S.L. Prischepa<sup>1,2</sup>***

<sup>1</sup> Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Belarus, 220013 Minsk, P. Browka 6, e-mail: [lizadronina@yandex.by](mailto:lizadronina@yandex.by)

<sup>2</sup> National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe highway 31

In this study, mechanisms leading to the deviation of the ideality factor from 1 are discussed. It is shown that the main reason is the presence of a native SiO<sub>x</sub> layer between the SWCNT film and Si, which leads to the appearance of surface states at the SWCNT/SiO<sub>x</sub> and SiO<sub>x</sub>/Si interfaces. This affects the work function of the SWCNT film which we estimated as  $F_f \approx 4.61$  eV. This value exceeds what follows from a simple analysis of the Schottky barrier, which gives  $F_f = 4.48$  eV. This discrepancy is attributed to the contribution of the interface charge. Its value was estimated as  $Q_{is} = 2.02 \times 10^{-8} \text{C/cm}^2$ .

Для барьеров Шоттки отклонение коэффициента неидеальности ( $\eta$ ) от единицы обычно связывают с такими процессами, как рекомбинация, диффузия в обедненном слое, туннелирование Фаулера–Нордгейма, влияние сил изображения, неоднородность распределения барьера по площади контакта, а также с наличием промежуточных оксидных слоев.

Полученные нами значения коэффициента неидеальности ( $\eta = 2.85$ ) и высоты барьера Шоттки ( $\phi_B = 0.43$  eV) в контактах ОСУНТ/Si в соответствии с методом [1] указывают на то, что исследуемая структура, содержащая промежуточный слой оксида кремния с туннельной толщиной (2–3 nm), характеризуется наличием интерфейсных состояний, которые способствуют локализации заряда и, таким образом, приводят к отклонению ВАХ барьера Шоттки от идеальной.

Связь между параметрами гетероперевода ОСУНТ/SiO<sub>x</sub>/Si в рамках зонной диаграммы, представленной на рис. 1, может быть установлена в соответствии с выражением:

$$F_f - \chi_s - \varphi_B - \Delta\varphi = \sqrt{\frac{2q^2 \varepsilon_s \varepsilon_0 N_D \delta^2 (\varphi_B + \Delta\varphi - \varphi_n - kT)}{(\varepsilon_i \varepsilon_0)^2}} - \frac{q^2 D_{is} \delta}{(\varepsilon_i \varepsilon_0)} (E_g - \varphi_0 - \varphi_B - \Delta\varphi), \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi = \sqrt{qE/(4\pi\varepsilon_s\varepsilon_0)}$ , а  $D_{is} = \text{const}$  в диапазоне энергий от  $\varphi_0$  до уровня Ферми  $E_F$ .

На основе полученных экспериментальных данных и предварительных оценок были рассчитаны параметры барьера Шоттки (табл. 1) путем варьирования величин, входящих в уравнение (1).

Таблица 1

Параметры гетероперехода ОСУНТ/SiO<sub>x</sub>/Si

$\delta$ , nm	$F_f$ , eV	$\Delta\varphi$ , eV	$\Delta$ , meV	$\varphi_0$ , eV	$D_{is}$ , cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup>	$D_{if}$ , cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup>	$Q_{is}$ , C/cm <sup>2</sup>	$Q_{if}$ , C/cm <sup>2</sup>
2.0	4.602	0.12	1.75	0.564	$2.1 \times 10^{13}$	$6.38 \times 10^{11}$	$2.02 \times 10^{-8}$	$3.02 \times 10^{-9}$
3.0	4.625	0.14	4.96	0.542	$1.42 \times 10^{13}$	$5.57 \times 10^{11}$	$1.82 \times 10^{-8}$	$5.71 \times 10^{-9}$

Определенная в рамках модели влияния промежуточного оксидного слоя работа выхода пленки ОСУНТ  $F_f$  составляет  $4,61 \pm 0,015$  eV в зависимости от толщины собственного оксида кремния. С другой стороны, работа выхода без учета промежуточного оксидного слоя равна  $F_f = \chi_s + \varphi_B = 4,48$  eV. Таким образом, разница в 0,12–0,14 эВ обусловлена вкладом интерфейсных состояний оксида кремния.

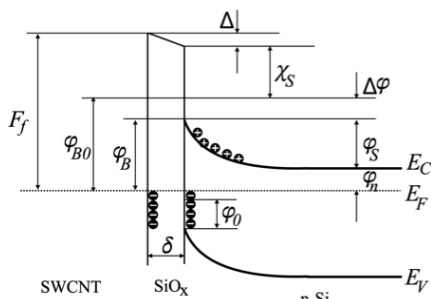


Рис. 1. Зонная диаграмма гетероперехода ОСУНТ/SiO<sub>x</sub>/Si

Стоит также отметить, что полученное значение уровня нейтральности  $\varphi_0$  находится в хорошем соответствии с данными для барьеров металл/кремний, сообщаемыми в литературе.

#### Литература

1.S. Cheung and N. Cheung. Appl. Phys. Lett. **49**, 2 (1986).

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ БАРЬЕРА ШОТТКИ  
ОСУНТ/КРЕМНИЙ**

*\*Е.А. Дронина<sup>1</sup>, Н.Г. Ковальчук<sup>2</sup>, Е.В. Луценко<sup>3</sup>, А.В. Данильчик<sup>3</sup>, С.Л. Прищеп<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail: [lizadronina@yandex.by](mailto:lizadronina@yandex.by)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

<sup>3</sup>Институт физики имени Б.И. Степанова, Беларусь, 220072, пр. Независимости, 68

**TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE SCHOTTKY BARRIER PARAMETERS  
SWCNT/SILICON**

*\*L.A. Dronina<sup>1</sup>, N.G. Kovalchuk<sup>1</sup>, E.V. Lutsenko<sup>3</sup>, A.V. Danilchuk<sup>3</sup>, S.L. Prischepa<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Belarus, 220013 Minsk, P. Browka 6, e-mail: [lizadronina@yandex.by](mailto:lizadronina@yandex.by)

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe highway 31

<sup>3</sup>Stepanov Institute of Physics of NAS Belarus, Nezavisimosti Av. 68  
Minsk 220072, Belarus

In this study, the current conduction mechanisms of the Schottky barrier diodes based on single-walled carbon nanotube (SWCNT) film/Si heterojunctions are investigated using the forward current-voltage- temperature measurements over a wide temperature range, down to 10 K. Experimental results show an increase of the values of barrier height ( $\phi_B$ ) and a decrease of the values of ideality factor ( $\eta$ ) with increasing temperature, extracted from Chueng's method. This abnormal behavior of  $\phi_B$  and  $\eta$  can be explained by the presence of barrier inhomogeneities, especially at low temperature. In addition, the value of Richardson constant ( $A^*$ ) were found to be  $8.74 \times 10^{-9} \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$  from the intercept at the ordinate of the linear region of Richardson plot.

Эффективность работы фотодетекторов на основе гетеропереходов одностенные углеродные нанотрубки (ОСУНТ)/кремний является предметом интенсивных исследований в настоящее время. Это обусловлено как высокой электрической проводимостью и оптической прозрачностью тонких пленок из ОСУНТ, так и их совместимостью с существующими кремниевыми технологиями. Однако, несмотря на обширное количество работ, посвященных созданию фотодетекторов посредством переноса тонких слоев из ОСУНТ на кремниевую подложку, отсутствует детальное изучение электрических характеристик этих гетеропереходов в широком диапазоне температур. Подобные исследования необходимы для глубокого понимания



фундаментальных принципов работы разрабатываемых на их основе фотодетекторов и расширения диапазона их рабочих температур. В этой связи в данной работе исследовались прямые темновые вольтамперные характеристики гетероперехода ОСУНТ/n-Si в диапазоне температур 10–315 К (рис. 1а). Детали формирования гетероперехода и геометрии образца можно найти в работе [1]. Из аппроксимации экспериментальных данных (рис. 1б) согласно модели [2], были определены значения высоты барьера Шоттки ( $\phi_B$ ) и коэффициента неидеальности ( $\eta$ ). Установлено, что высота барьера линейно растет с температурой достигая значения  $\sim 0,72$  эВ для  $T = 315$  К, в то время как коэффициент неидеальности уменьшается с ростом температуры. Такое поведение  $\phi_B$  и  $\eta$  может быть связано с наличием неоднородностей высоты барьера, особенно при низкой температуре, которые, в свою очередь, могут быть обусловлены шероховатостью границы раздела, дискретностью пленки или же разбросом диаметров ОСУНТ.

Из температурной зависимости  $\ln(I_0/T^2)$  от  $q/kT$  (вставка на рис. 1а) было получено значение постоянной Ричардсона ( $A^* = 8.74 \times 10^{-9}$  А см $^{-2}$  К $^{-2}$ ) которое значительно ниже ее теоретического значения (для n-Si  $\approx 112$  Асм $^{-2}$  К $^{-2}$ ). Различие в значениях постоянной Ричардсона может быть связано с наличием изолирующего слоя на границе ОСУНТ/ кремний.

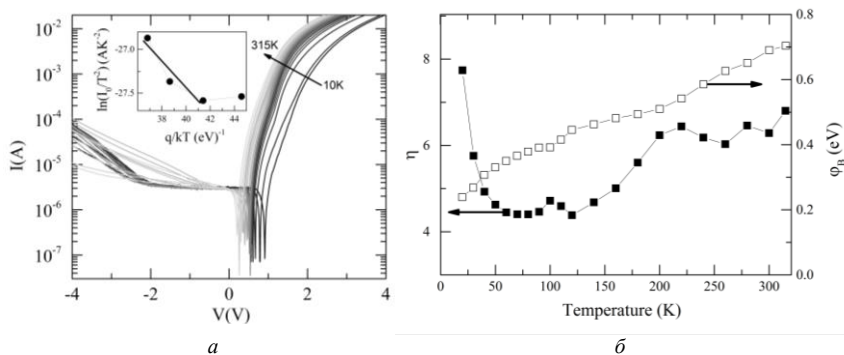


Рис. 1. а) Темновые ВАХ в полулогарифмическом масштабе в зависимости от температуры. Вставка демонстрирует график Ричардсона. б) Высота барьера Шоттки ( $\phi_B$ ) и коэффициент неидеальности контакта ( $\eta$ ) в зависимости от температуры

### Литература

1. I. Komissarov, et al. Phys. Status Solidi C, **10**, 7-8 (2013).
2. S. Cheung and N. Cheung. Appl. Phys. Lett. **49**, 2 (1986).

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ИК СПЕКТРОСКОПИИ ПЛЕНКИ  
ИЗ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК**

*\*Е.А. Дронина<sup>1</sup>, Н.Г. Ковальчук<sup>1</sup>, П.И. Гайдук<sup>3</sup>, С.Л. Прищепа<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail: [lizadronina@yandex.by](mailto:lizadronina@yandex.by)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет  
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

**INFRARED SPECTROSCOPIC INVESTIGATION OF SINGLE  
WALL CARBON NANOTUBE FILM**

*\*L.A. Dronina<sup>1</sup>, N.G. Kovalchuk<sup>1</sup>, P.I. Gaiduk<sup>3</sup>, S.L. Prischepa<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Belarus, 220013 Minsk  
P. Browka 6, e-mail: [lizadronina@yandex.by](mailto:lizadronina@yandex.by)

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe highway 31

<sup>3</sup>Belarusian State University, Nezavisimosti Av., 4, Minsk 220030, Belarus

In this study, single-walled carbon nanotube (SWCNT) film was characterized by means of ultraviolet/visible/near-infrared spectroscopy (UV–vis–NIR) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The single-walled nature of our nanotubes was proven and confirmed by Raman and infrared spectroscopy, respectively. Using the universal method to analyze absorption UV–vis–NIR spectra regardless of the form or overlap of the absorption bands we evaluate the mean diameter of 1.08 nm. FTIR studies have been performed for the identification of the functional group attached on the surface of the SWCNTs after ethanol treatment. It was shown that as a result of treatment the film in ethanol the oxygen-containing groups are formed on the SWCNT surface.

Высокая оптическая прозрачность одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) в совокупности с высокой подвижностью носителей заряда делают их перспективным материалом для использования в качестве прозрачного электрода в детекторах света.

В данной работе представлено исследование методами UV–vis–NIR спектроскопии и ИК-Фурье спектроскопии распределения ОСУНТ по диаметрам в пленке и состава функциональных групп на ее поверхности, соответственно. ОСУНТ синтезировались методом химического парофазного осаждения на кремнии из раствора ферроцена/этанола [1].

Расшифровка данных ИК-Фурье спектров (рис. 1а) с использованием значений характерных полос для различных кислородосодержащих групп

показала, что на поверхности образца прошедшего для увеличения адгезии к подложке обработку в этаноле присутствуют кислородосодержащие функциональные группы, включая карбоксильные, карбонильные и гидроксильные. Также на спектре ОСУНТ после обработки этанолом присутствуют пики в диапазоне  $400\text{--}700\text{ см}^{-1}$ , обусловленные наличием фрагментов разложения ферроцена. Стоит также отметить, что отсутствие характерных для углеродосодержащих материалов полос в районе  $\sim 1600\text{ см}^{-1}$  объясняется высокой симметрией ОСУНТ, которые, в свою очередь, генерирует очень слабые ИК сигналы.

Как видно из рис. 1б, пики поглощения расширяются и накладываются друг на друга, что может быть объяснено близким распределением ОСУНТ по диаметрам и тенденцией нанотрубок к агрегации в макроструктуры. Используя универсальный метод анализа спектров поглощения независимо от формы или перекрытия полос поглощения [2], мы оценили средний диаметр  $\sim 1,08\text{ нм}$  и диапазон распределения диаметров  $0,8\text{--}2,0\text{ нм}$  (вставка на рис. 1б). Стоит также отметить, что данные распределения диаметров находятся в хорошем соответствии с соответствующими данными, полученными с помощью анализа спектров комбинационного рассеяния света.

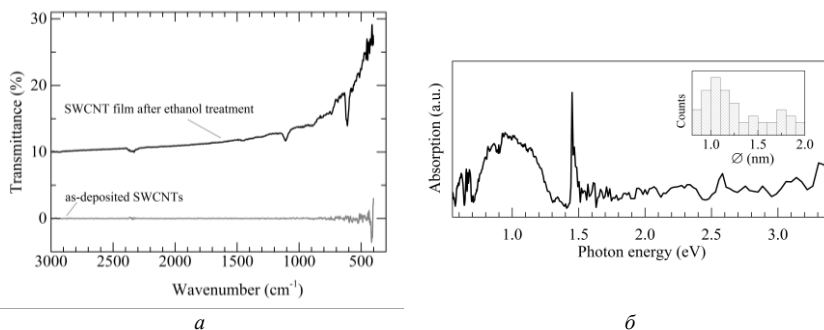


Рис. 1. а) ИК-Фурье спектры ОСУНТ до и после обработки в этаноле. б) ИК-спектр пленки из ОСУНТ после вычитания фона. На вставке представлена гистограмма распределения ОСУНТ по диаметрам

### Литература

1. I. Komissarov et al. Phys. Status Solidi C, **10**, 7-8 (2013).
2. Y. Tian et al. J. Phys. Chem. Lett. **1**, 7 (2010).

**ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ГИДРАТИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ  
ФУЛЛЕРЕНА  $C_{60}@{H_2O}_n$  В ВОДНЫХ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРАХ**

**\*Н.А. Торхов**

Севастопольский государственный университет (СевГУ)  
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, дом 33, e-mail: [trkf@mail.ru](mailto:trkf@mail.ru)

**PROCESSES OF SELF-ORGANIZATION OF HYDRATED COMPLEXES  
OF FULLERENES  $C_{60}@{H_2O}_n$  IN AQUEOUS COLLOIDAL SOLUTIONS**

**\*N.A. Torkhov**

Sevastopol State University (SevSU)  
Russia, 299053, Sevastopol, st. Universitetskaya, house 33, e-mail: [trkf@mail.ru](mailto:trkf@mail.ru)

The work used a synergetic approach that allows, from a unified position, to make intensive progress in the field of understanding the mechanisms of self-organization of fullerene complexes  $C_{60}@{H_2O}_n$  in aqueous colloidal systems into  $[C_{60}@{H_2O}_n]_j$  clusters.

В настоящее время фуллерен  $C_{60}$  активно изучается из-за широкого спектра его производных и потенциальных применений в полупроводниковых [1], органических [2], химических и биофизических [3] нанотехнологиях, водородной [4] и солнечной [5] энергетике, медицине [6]. Уникальные электрофизические и химические свойства такой молекулы позволяют использовать её как в виде самостоятельных одиночных молекул  $C_{60}$ , так и в составе различных конденсированных (молекулярных кристаллов (фуллеритов) [7], их эпитаксиальных слоев [8]) и коллоидных системах [9].

В работе использовался синергетический подход позволяющий с единых позиций осуществить интенсивное продвижение в области понимания механизмов самоорганизации комплексов фуллерена  $C_{60}@{H_2O}_n$  в кластеры  $[C_{60}@{H_2O}_n]_j$  в водных коллоидных системах: диффузионного характера их агрегации (фрактальной размерностью дисперсного состава  $D_f(d) = 1.00-1.90$  и активационного характера диссоциации ( $D_f(d) = 1.22-1.00$  и энергией активации  $|\varepsilon_k| \approx 0.28$  eV), температурных зависимостей дисперсного состава  $N_\Sigma = N_\Sigma(d, T_i)$  и степеней свободы (количества уровней статистического самоподобия)  $M_i = M_i(T_i)$ .

Проведение данных исследований стало возможным благодаря использованию современных методов АСМ позволяющих с достаточной точностью проводить измерения комплекса необходимых геометрических параметров и физических функциональных характеристик с высоким пространственным разрешением на достаточно больших сравнимых с размерами

капли аликвоты расстояниях. Верификация наблюдаемых в результате фазовых переходов второго рода температурных эволюций дисперсного состава осуществлялась с использованием высокоточного калориметрического метода DSC (Differential Scanning Calorimetry) путем прецизионного измерения удельной теплоемкости  $c_{vc} = c_{vc}(T)$  капли аликвоты водного коллоидного раствора фуллерена в исследуемом температурном диапазоне  $T_i = 24-70$  °C.

Описанные в работе подходы и методы, обнаруженные явления и закономерности могут найти применение в различных научных и технологических приложениях, например, химической и электронной промышленности, для приготовления нанодисперсных полировальных суспензий, эффективных топливных и смазочных полидисперсных систем для различного рода тепловых машин, разработке пористых материалов, фармацевтики, биоинженерии, медицины.

Автор выражает благодарность Мосунову А.А. за помощь в подготовке образцов.

#### Литература

1. David F. Kronholm, J.C. Hummelen, Alexander B Sieval, Patrick Van't Hof. Patent №: US 8,945,807 B2, date of Patent: Feb. 3, 2015.
2. Peter J. F. Harris, Fullerene Polymers: A Brief Review. *Journal of Carbon Research*. **6** (2020) 71; DOI:10.3390/c6040071.
3. O. Yablonskaya, E. Buravleva, K. Novikov, V. Voeikov. *Front. Pharmacol.* **9** (2021) 627265; DOI: 10.3389/fph.2021.627265.
4. J.C. Withes, R.O. Loutfy, T.P. Lowe. *Fullerene Science and Technology*. **5**(1) (1997) 1-31.
5. Tian C. Sun C. Chen J. Song P. Hou E. Xu P. Liang Y. Yang P. Luo J. Xie L. et.al. *Nanomaterials*. **12** (2022) 532. DOI: 10.3390/nano12030532.
6. Ajay Kumar, Fullerenes For Biomedical Applications. *Journal of Environmental and Applied Bio-research*. **3**(4) (2015) 175 – 191; ISSN: 2319 8745.
7. Y.I. Prylutsky, S.S. Durov, L.A. Bulavin, I.I Adamenko, K.O. Moroz, I.I. Geru, et al. *Int. J. Thermophys.* **22** (2001) 943–55.
8. W. Janke and T. Speck. *The Journal of Chemical Physics*. **154** (2021) 234701; DOI: 10.1063/5.0051188.
9. U. Ritter, Yu. I. Prylutsky, M.P. Evstigneev, N.A. Davidenko, V.V. Cherepanov, A.I. Senenko, O. A. Marchenko & A. G. Naumovets. *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*. **23**:6 (2015) 530-534; DOI: 10.1080/1536383X.2013.870900.

**СВОЙСТВА ИБУПРОФЕН-СЕРЕБРЯНО-ГРАФЕНОВЫХ НАНОЧАСТИЦ  
ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ПРОТИВОРАКОВОЙ ТЕРАПИИ**

*A.C. Дринеvский<sup>1</sup>, E.A. Зелковский<sup>1</sup>, E.C. Карпилова<sup>1,2</sup>, B.A. Лабунoв<sup>1</sup>, N.I. Kаргин<sup>3</sup>,  
\*D.V. Радюк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, улица П. Бровки, дом 6, e-mail: [radziuk@bsuir.by](mailto:radziuk@bsuir.by)

<sup>2</sup>БГУ, Беларусь, 220030, г. Минск, улица Ленинградская, дом 14

<sup>3</sup>НИЯУМИФИ, Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31

**PROPERTIES OF IBUPROFEN-SILVER-GRAPHENE NANOPARTICLES  
FOR MICROWAVE CANCER THERAPY**

*A.S. Drinevskiy<sup>1</sup>, E.A. Zelkovskiy<sup>1</sup>, E.S. Karpilova<sup>1,2</sup>, V.A. Labunov<sup>1</sup>, N.I. Kargin<sup>3</sup>,  
\*D.V. Radziuk<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Belarus, 220013 Minsk, P. Brovka street 6, e-mail: [radziuk@bsuir.by](mailto:radziuk@bsuir.by)

<sup>2</sup>Belarusian State University, Belarus, 220030 Minsk, Leningradskaya street 14

<sup>3</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe hw, 31

In our work the modeling of temperature bioheat distribution in cervical cancer tumor containing nanoparticles «ibuprofen-Ag-rGO» under microwave irradiation is demonstrated. The modeling is based on using a nanoparticle modified thin coaxial slot antenna in liver tissue for microwave coagulation anticancer therapy. In contrast to «ibuprofen-Ag», the speed of temperature increase on the surface of «ibuprofen-Ag-rGO» nanoparticles occurs in the whole microwave region from 0,1 GHz to 1 GHz caused by the specific interaction of irradiation with rGO and ibuprofen.

Биосовместимые и каталитически активные металлографеновые наноматериалы высоко востребованы в микроволновой терапии раковых заболеваний [1, 2]. Для эффективности микроволновой терапии требуются вращающиеся молекулярные диполи с выделением энергии в виде тепла в результате внутреннего резистивного отклика молекул на вынужденное вращение. Несмотря на высокую электропроводность Ag, его низкая емкость и высокий коэффициент диэлектрических потерь способствуют отражению микроволн, что приводит к уменьшению глубины их проникновения. Увеличить поглощение микроволн можно при наличии функциональных групп на поверхности наночастиц Ag посредством излучательного возбуждения химических реакций. Исходя из этого, в наночастицах «ибупрофен-Ag» такими поглощающими функциональными группами могут быть образованные комплексы молекул ибупрофена, содержащие донорно-акцепторные C-O и C=O связи. В итоге происходит электрическая дипольная поляризация

в структуре «ибупрофен-Ag». КГ в наночастицах «ибупрофен-Ag-кГ» может способствовать созданию поляризации и электронной дипольной релаксации функциональных групп, что улучшает проникновение микроволн и их поглощение наночастицами в опухолевых тканях. Однако для практического применения необходимо оценить температуру поверхности наночастиц «ибупрофен-Ag-кГ» при микроволновом излучении, что представляет собой нерешенную задачу.

В связи с этим, целью нашей работы является моделирование распределения температуры биотепла в опухоли шейки матки, содержащей «ибупрофен-Ag-кГ» в сравнении с «ибупрофен-Ag» в диапазоне излучения от 0,1 ГГц до 1 ГГц. Моделирование было выполнено с использованием программы COMSOL Multiphysics 4.3 при использовании тонкой коаксиальной щелевой антенны, модифицированной наночастицами, в ткани печени для микроволновой коагуляционной терапии. В результате моделирования выявлена нелинейная зависимость уменьшения температуры на поверхности наночастиц, как без кГ, так и с кГ при увеличении электропроводности на фиксированной частоте микроволнового излучения (рис. 1а, б).

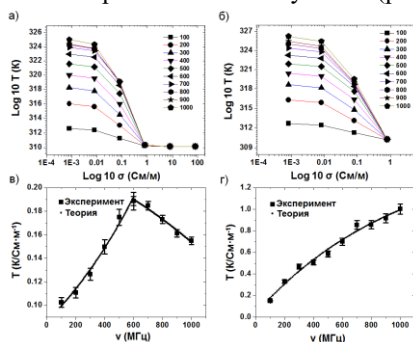


Рис. 1. Графики зависимости температуры на поверхности наночастиц «ибупрофен-Ag» (а) и «ибупрофен-Ag-кГ» (б) и скорости ее изменения от частоты микроволнового излучения в этих наночастицах без кГ (в) и с кГ (г)

Установлена прямо пропорциональная зависимость изменения температуры в наночастицах от частоты микроволнового излучения от 100 МГц до 1 ГГц. Выявлено, что скорость изменения температуры ( $\sim 898$  К/См  $\cdot$  м<sup>-1</sup>) в наночастицах «ибупрофен-Ag» экспоненциально растет от 100 МГц до 600 МГц, а затем падает ( $\sim 1458$  К/См  $\cdot$  м<sup>-1</sup>) от 600 МГц до 1 ГГц (рис. 1в). В «ибупрофен-Ag-кГ» скорость увеличения температуры  $\sim 1018$  К/См  $\cdot$  м<sup>-1</sup> наблюдается в целом диапазоне частот (рис. 1г), что обусловлено специфическим взаимодействием микроволнового излучения с кГ и ибупрофеном.

**АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК  
ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ**

**\*В.С. Шахматов<sup>1</sup>, В.А. Шакиров<sup>1</sup>, Я.Р. Яцков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
Россия, 249039, Калужская область, г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1  
e-mail: [shakh52@rambler.ru](mailto:shakh52@rambler.ru)

**ANALYSIS OF STRUCTURAL TRANSFORMATIONS OF CARBON NANOTUBES  
UNDER EXTERNAL FIELDS**

**\*V.S. Shakhmatov<sup>1</sup>, V.A. Shakirov<sup>1</sup>, Ya.R. Yatskov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering  
Russia, 249039, Kaluga reg., Obninsk, Studgorodok, b.1  
e-mail: [shakh52@rambler.ru](mailto:shakh52@rambler.ru)

An analysis of structural transformations of carbon nanotubes at mechanical stretch and electrical field is performed. Phenomenological theory of such structural transformations is proposed. Further possible experimental and theoretical investigations are discussed.

Уникальные физические свойства углеродных наноматериалов [1] находят широкое практическое применение. В работе [2] продемонстрирована технология контролируемого изменения структуры углеродных нанотрубок (УНТ) во внешних полях. Многослойная УНТ в электронном микроскопе подвергалась механическому растяжению и нагреву прямоугольными импульсами электрического тока. В экспериментах измерялось сопротивление образца и методом дифракции электронов определялась структура УНТ. Было обнаружено, что при таких воздействиях на образец, внешние слои многослойной УНТ испарялись, а структуру конечной однослойной УНТ можно изменить: полупроводниковая УНТ становилась металлической, что подтверждалось также дифракционными измерениями. Структурные изменения УНТ объяснялись возникновением дефектов Стоуна-Уэльса (см., например, [3]).

Структура УНТ определяет основные физические свойства образца [1]. В работе [4] мы исследовали пространственную симметрию УНТ и предложили обозначение пространственных групп с учетом трансляционной симметрии. В работе [5] исследованы фононы в центре зоны Бриллюэна УНТ(3,3). Здесь индексы в скобках обозначают основные векторы трансляции УНТ в исходной графеновой плоскости.



Феноменологическая теория для описания структурных изменений УНТ при механическом растяжении предложена в работе [6]. Разложение термодинамического потенциала имеет вид:

$$F_{\sigma} = \frac{1}{2} B_{\sigma} \varphi_{\sigma}^2 + \frac{1}{2} C_{\sigma} e_{zz}^2 + D_{\sigma} \varphi_{\sigma} e_{zz} - e_{zz} \sigma_{zz}.$$

Здесь  $B_{\sigma}$ ,  $C_{\sigma}$  и  $D_{\sigma}$  – феноменологические константы,  $\sigma_{zz}$  – внешнее растягивающее напряжение,  $e_{zz}$  – деформация,  $\varphi_{\sigma}$  – фононная переменная, описывающая структурные изменения. Анализ структурных изменений УНТ(3,3) при механическом растяжении  $\sigma_{zz}$  приведен в работе [6].

Аналогичное по структуре разложение термодинамического потенциала имеет место для внешнего электрического поля. Электрическое поле понижает симметрию УНТ (для УНТ(3,3) точечная симметрия понижается с  $D_{6h}$  до  $C_{6v}$ ). Экспериментально это можно обнаружить по измерениям фоновых оптических спектров (подробнее см., [6]).

Для внешнего магнитного поля, направленного вдоль оси УНТ, взаимодействие с фононами записывается иначе,  $D_H \varphi_H M_z^2$ , т.е. квадратично зависит от намагниченности (или от магнитного поля, из-за симметрии по отношению к обращению времени).

Магнитное поле, по-видимому, слабо влияет на структуру УНТ.

Проведенный нами анализ хорошо подходит для объяснения небольших структурных изменений УНТ. Для описания структурных изменений, экспериментально наблюдаемых в работе [2], необходимы дальнейшие теоретические исследования.

### Литература

1. R. Saito et.al. Physical properties of carbon nanotubes. World Scientific Publishing, 1998.
2. Dai-Ming Tang et.al., Ultramicroscopy **194**, 11, 108 (2018).
3. А.И. Подливаев, Письма в ЖЭТФ **110**, 10, 692 (2019).
4. В.Л. Аксенов и др., Письма в ЭЧАЯ, № 4, 5 (2000).
5. В.А. Шакиров и В.С. Шахматов, Материалы 51-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского «Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники», С310 (2016).
6. В.С. Шахматов, Материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского «Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность». Часть 2, С134 (2020).

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА КОВАЛЕНТНЫХ ЦЕПЕЙ  
НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙЗАМЕЩЕННЫХ CL-20**

*\*М.А. Гимальдинова, М.М. Маслов, К.П. Катин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31  
e-mail: [margaritagimaldinova@gmail.com](mailto:margaritagimaldinova@gmail.com)

**ENERGY AND ELECTRONIC PROPERTIES OF COVALENT CHAINS BASED  
ON SILICON-SUBSTITUTED CL-20**

*\*M.A. Gimaldinova, M.M. Maslov, K.P. Katin*

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [margaritagimaldinova@gmail.com](mailto:margaritagimaldinova@gmail.com)

The covalent simple and double chains based on silicon-substituted CL-20 molecules were studied in this work. The DFT/PBE0/6-311G(d, p) level of theory was used. It has been established that the binding energy and the thermodynamic stability of the SiCL-20 chains increases with their length and dimension. In this case, the size of the HOMO-LUMO gap decreases. However, the obtained values of HOMO-LUMO gap are not enough to ensure electronic conductivity. So, this study will be useful for predicting the use of covalent SiCL-20 compounds in various energy and electronic applications.

В настоящей работе были рассмотрены энергетические и электронные свойства ковалентных цепочек на основе кремнийзамещенной молекулы CL-20 [1], в каркасе которой пять атомов углерода заменены атомами кремния, соединенных посредством функциональных групп CH<sub>2</sub>. Исследование было проведено для простых и двойных цепочек SiCL-20 (рис. 1) с помощью программного комплекса TeraChem [2] на уровне теории DFT/PBE0/6-311G(d, p).

Для исследования термодинамической стабильности были получены энергии связи  $E_b$  цепочек SiCL-20 (рис. 2). Энергия связи  $E_b$  наноструктуры на один атом определялась уравнением:

$$E_b \left[ \frac{\text{eV}}{\text{atom}} \right] = \frac{1}{N_{at}} \{iE(\text{H})+kE(\text{O})+lE(\text{N})+mE(\text{C})+nE(\text{Si})-E_{tot}(\text{SiCL-20})\},$$

где  $N_{at} = i + k + l + m + n$  – полное число атомов в системе;  $E_{tot}(\text{SiCL-20})$  – полная энергия наноструктуры;  $E(\text{H})$ ,  $E(\text{O})$ ,  $E(\text{N})$ ,  $E(\text{C})$ ,  $E(\text{Si})$  – энергии изолированных атомов водорода, кислорода, азота, углерода и кремния.

НОМО-ЛУМО щель  $\Delta_{HL}$  систем была определена как разница энергий высшей занятой и нижней свободной молекулярных орбиталей (рис. 3).

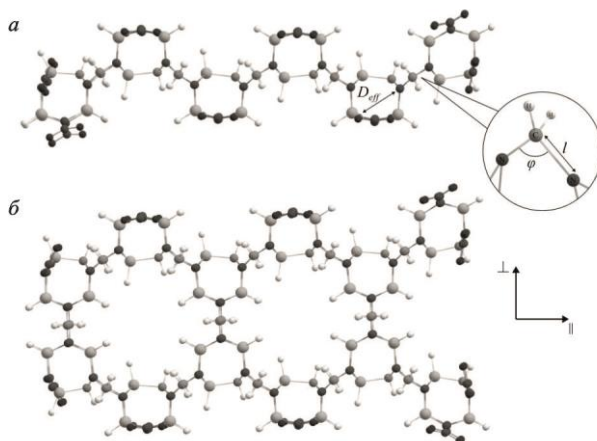


Рис. 1. Простая цепочка SiCL-20  $6 \times 1$  (a); двойная цепочка SiCL-20  $6 \times 2$  (b)

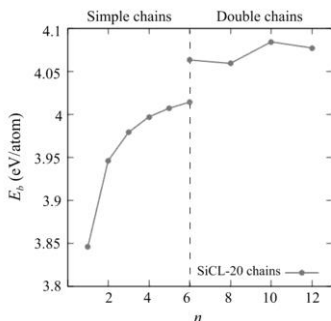


Рис. 2. Зависимость энергии связи  $E_b$  от числа  $n$  фрагментов кремниевых CL-20

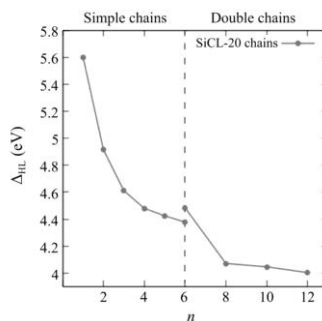


Рис. 3. Зависимость НОМО-LUMO щели  $\Delta_{HL}$  от числа  $n$  фрагментов кремниевых CL-20

Установлено, что энергия связи и, как следствие, термодинамическая стабильность цепочек возрастает при увеличении количества фрагментов кремниевых CL-20, а также размерности соединения. НОМО-LUMO щель при этом убывает. Тем не менее, полученных значений НОМО-LUMO щели недостаточно для того, чтобы обеспечить электронную проводимость.

### Литература

1. Т.М. Klapötke. In High Energy Density Materials, **125**. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2007).
2. I. S. Ufimtsev, T. J. Martinez, J. Chem. Theory Comput. **5**, 2619 (2009).

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ  
И ЭЛЕКТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАТИНОВЫХ НАНОТРУБОК**

***В.Б. Меринов, П.А. Кулямин***

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [merinov.v.b@gmail.com](mailto:merinov.v.b@gmail.com)

**AB INITIO STUDY OF STRUCTURAL AND ELECTRONIC CHARACTERISTICS  
OF PLATINUM NANOTUBES**

***V.B. Merinov, P.A. Kulyamin***

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [merinov.v.b@gmail.com](mailto:merinov.v.b@gmail.com)

Using density functional theory based on the method of plane wave basis sets and relativistic linear augmented cylindrical waves, taking into account the spin-orbital interaction, we obtained the structural, electronic and spin properties of platinum nanotubes with chirality indices  $n = 6$  and  $m = 6, 5, 4, 3$ . It was shown that the spin-orbit coupling induces the strong splitting of non-relativistic dispersion curves near the Fermi energy region. Analysis of the electronic characteristics shows that only the Pt(6,3) nanotube is suitable for generating the spin currents with ballistic conductivity equal to  $16G_0$ .

Повышенный интерес наблюдается в сфере мезоскопической физики, химии и катализа к одномерным материалам на основе благородных металлов. Современные методы синтеза нанотрубок позволяют получать одномерные материалы из Pt, Au, Pd и Ag, что находит применение в разработке композитных материалов. В частности, платиновые трубки используются в качестве катализаторов в химических реакциях или в проектировании электронных приложений. По мере развития технологии синтеза и поиска применения платиновых нанотрубок проводятся и теоретические исследования. Как известно, платина является тяжелым металлом, и винтовая структура нанотрубки сильно влияет на спин-орбитальное взаимодействие, что аналогично наблюдается в случае углеродных нанотрубок. Большинство работ не проводит детальный анализ спин-орбитального взаимодействия с разделением электронов по спину.

В настоящей работе с помощью компьютерного моделирования в рамках теории функционала плотности (DFT) методом базисных наборов плоских волн (PAW) и линейаризованных присоединенных цилиндрических волн (LACW) с учетом спин-орбитального взаимодействия мы исследовали структурные, электронные и спиновые свойства треугольных платиновых нанотрубок с индексами  $n = 6, m = 6, 5, 4, 3$ . Такие одностенные нанотрубки

построены путем свертывания листа Pt(111) толщиной в один атом и представляют собой треугольную сетчатую поверхность, закрученную вдоль оси цилиндрической структуры, где в качестве индексов скручивания используются общепринятые индексы  $N$  и  $M$  (рис. 1) [1].

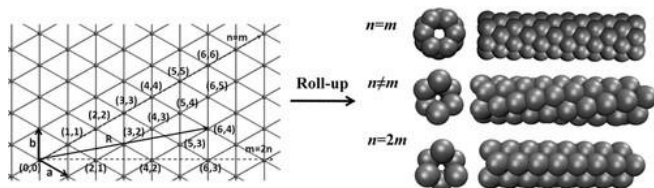


Рис. 1. Скручивание плоской треугольной сетки атомов платины. Базисные векторы обозначаются как  $a$  и  $b$ ; каждая трубка обозначается двумя целыми числами  $(n, m)$  [1]

Далее нами были построены элементарные ячейки треугольные нанотрубки Pt(6.6), Pt(6.5), Pt(6.4) и Pt(6.3), после чего мы провели полную оптимизацию полученных структур с помощью DFT/PAW. Полученные оптимизированные координаты мы использовали для расчета зонной структуры и плотности состояний с разделением электронов по спину методом LACW. Анализ электронной зонной структуры показал расщепление дисперсионных кривых на уровне Ферми до 0.5 эВ, а для образования спиновых токов подходит только нанотрубка Pt(6.3) с баллистической проводимостью в  $16G_0$ , согласно методу LACW (рис. 2).

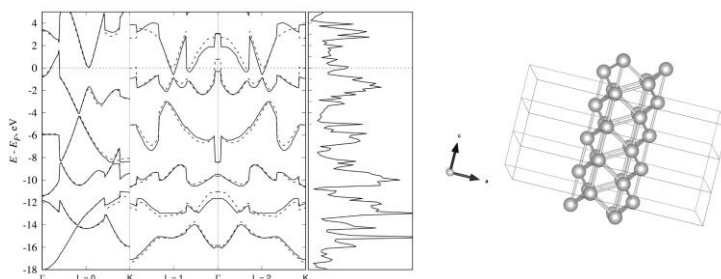


Рис. 2. Зонная структура и плотность состояний (слева), и структура платиновой нанотрубки Pt(6.3) (справа). Сплошные и штриховые линии соответствуют зонным состояниям со спином вверх и спином вниз

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 24-23-00037.

#### Литература

1. Matanovic I, et al., J. Phys. Chem. C **116**, 16499 (2012).

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ  
ПОРОШКОВОГО ПЕРОВСКИТА  $\text{BaTiO}_3\text{:Eu}^{2+/3+}$**

*\*Л.С. Хорошко<sup>1,2</sup>, А.В. Баглов<sup>1,2</sup>, О.В. Королук<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
Беларусь, 220030, г. Минск, пр-т Независимости, дом 4, e-mail: [l.s.khoroshko@yandex.by](mailto:l.s.khoroshko@yandex.by)

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6

**SYNTHESIS AND STRUCTURE INVESTIGATION OF POWDER  
PEROVSKITE  $\text{BaTiO}_3\text{:Eu}^{2+/3+}$**

*\*L.S. Khoroshko<sup>1,2</sup>, A.V. Baglov<sup>1,2</sup>, O.V. Korolik<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University  
Belarus, 220030 Minsk, 4 Nezavisimosti Av., e-mail: [l.s.khoroshko@yandex.by](mailto:l.s.khoroshko@yandex.by)

<sup>2</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Belarus, 220013 Minsk, 6 P. Browka str.

In this work, we studied the evolution under the different temperature of Raman spectra of  $\text{Eu}^{2+/3+}$  doped barium titanate obtained by sol-gel method. At room temperature, we observe the peaks which are characteristic of the structure of both undoped barium titanate and containing europium. The appearance of additional bands in the  $< 200 \text{ cm}^{-1}$  region, indicating the phase transition of  $\text{BaTiO}_3$  from the rhombohedral (below 193 K) to the tetragonal (above 283 K) phase. We also established temperature-depended shifts of two peaks according to combined modes  $\text{A1(TO)}\&\text{E(TO)}$  at  $528 \text{ cm}^{-1}$  и  $\text{A1(LO)}\&\text{E(LO)}$  at  $714 \text{ cm}^{-1}$ , which are caused by phase transitions in the barium titanate and can be evidence for the formation of composite compounds in the Ba-Ti-Eu oxide system during the powder synthesis.

Легированный ионами лантаноидов титанат бария является материалом, интерес исследователей к которому остается стабильно высоким на протяжении многих лет, что обусловлено уникальным сочетанием сегнетоэлектрических и люминесцентных свойств, позволяющих получать многофункциональные материалы [1, 2]. Ранее мы сообщали о возможности наблюдения в титанате бария двухкатионной люминесценции европия, интенсивность которой зависит от режима возбуждения [3, 4]. В данной работе мы исследуем методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) особенности структуры порошка  $\text{BaTiO}_3\text{:Eu}^{2+/3+}$ .

Люминофор  $\text{BaTiO}_3\text{:Eu}^{2+/3+}$  получали золь-гель методом, как описано в [3, 4]. Температурно-зависимые КРС спектры регистрировали при возбуж-

дении лазерным излучением с длиной волны 532 нм с помощью спектрометра на базе конфокального микроскопа Nanofinder HE в вакуумной ( $5 \times 10^{-4}$  Па) термостатируемой ячейке в диапазоне температур 27–290 К.

В КРС спектрах, полученных при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 532 нм, при низких температурах отчетливо видны пики: 167,

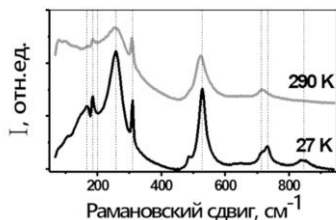


Рис. 1. Спектры КРС порошка  $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}^{2+/3+}$  при  $\lambda_{\text{возб}} = 532$  нм при различных температурах

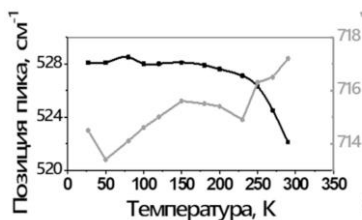


Рис. 2. Положения избранных пиков при различных температурах

185, 258, 310, 528, 714  $\text{см}^{-1}$  (рис. 1), характерные для структуры как нелегированного титаната бария, так и содержащего европий [5, 6]. При этом, при комнатной температуре мы наблюдаем появление в спектрах КРС дополнительных полос в области  $< 200 \text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует о фазовом переходе  $\text{BaTiO}_3$  из ромбоэдрической (ниже 193 К) в тетрагональную фазу (выше 283 К) [7]. Согласно [6], присутствие европия в системе, должно понижать температуру этого перехода. Смещения позиций пиков, связанных с комбинированными модами  $\text{A1}(\text{TO})\&\text{E}(\text{TO})$  на  $528 \text{ см}^{-1}$  и  $\text{A1}(\text{LO})\&\text{E}(\text{LO})$  на  $714 \text{ см}^{-1}$ , при изменении температуры обусловлены как фазовыми переходами в титанате бария, так и могут являться свидетельством формирования композитных соединений

в системе оксидов  $\text{Ba-Ti-Eu}$  в процессе синтеза порошка [5, 6]. Интерес дальнейших исследований сосредоточен на определении возможных кристаллических фаз, содержащих европий, исследовании мощностных зависимостей люминесценции и КРС, а также оценке влияния локального лазерного разогрева в процессе измерения на характеристики спектров.

#### Литература

1. Y. Meng et al., J. Am. Ceram. Soc. **105**, 5725 (2022).
2. B.D. Kavey et al., Cryst. Eng. Comm. **24**, 7089 (2022).
3. Л.С. Хорошко и др. Мокеровские чтения: сб. тр. 13-й Междунар. науч.-практ. конф., 25–26 мая 2022 г.:– М.: НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 106.
4. Л.С. Хорошко и др. Мокеровские чтения: сб. тр. 14-й Междунар. науч.-практ. конф., 24–25 мая 2023 г.:– М.: НИЯУ МИФИ, 2023. – С. 100.
5. M. Krupska-Klimczak et al., Materials **15**, 5363 (2022).
6. B. Poojitha et al., Phys. Rev. Mater. **3**, 024412 (2019).
7. V.K. Veerapandiyam et al., J. Eur. Ceram. Soc. **40**, 4684 (2020).

**РОСТ СВОБОДНЫХ ОТ ТРЕЩИН СЛОЁВ GaN-on-Si  
ВЫРАЩИВАЕМЫХ МЕТОДОМ NH<sub>3</sub>-MBE**

**\*Т.В. Малин<sup>1</sup>, Я.Е. Майдебур<sup>1</sup>, В.Г. Мансуров<sup>1</sup>, Т.А. Гаврилова<sup>1</sup>, А.К. Гутаковский<sup>1</sup>,  
В.И. Вдовин<sup>1</sup>, С.А. Понамарёв<sup>1</sup>, И.Д. Лошкарёв<sup>1</sup>, И.В. Осинных<sup>1</sup>, В.А. Володин<sup>1</sup>,  
Д.С. Милахин<sup>1,2</sup>, К.С. Журавлёв<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 13, 630090, e-mail: [ifp@isp.nsc.ru](mailto:ifp@isp.nsc.ru)  
<sup>2</sup>Новосибирский Государственный Технический Университет «НГТУ НЭТИ»  
г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, 630073, e-mail: [nstu@nstu.ru](mailto:nstu@nstu.ru)

**GROWTH OF CRACK-FREE GaN-on-Si LAYERS GROWN BY NH<sub>3</sub>-MBE**

**\*Timur Malin<sup>1</sup>, Yan Maidebura<sup>1</sup>, Vladimir Mansurov<sup>1</sup>, Tatyana Gavrilova<sup>1</sup>,  
Anton Gutakovsky<sup>1</sup>, Vladimir Vdovin<sup>1</sup>, Sergey Ponomarev<sup>1</sup>, Ivan Loshkarev<sup>1</sup>,  
Igor Osinnykh<sup>1</sup>, Vladimir Volodin<sup>1</sup>, Denis Milakhin<sup>1,2</sup>, Konstantin Zhuravlev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Russia, Novosibirsk, 630090  
<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk, 630073

It is shown that the nitridation conditions of the silicon substrate are no less important factor affecting the cracks formation in GaN-on-Si layers grown by the ammonia assisted MBE method than the structure of the buffer layer. Furthermore, the morphology of GaN on silicon substrate layers is independent of the buffer layer structure, instead it is determined by the growth conditions of GaN. Nevertheless, the use of step-graded AlGaIn buffer layers, instead of a buffer layer with an intercalated AlN layer, leads to a higher crystalline perfection of the crack-free GaN on silicon substrate layers and to lower residual tensile stresses therein.

Установлено, что условия нитридации кремниевой подложки являются не менее важным фактором, влияющим на образование трещин в слоях GaN-on-Si, выращиваемых методом NH<sub>3</sub>-MBE, чем конструкция буферного слоя. Продемонстрировано, что морфология слоев GaN-on-Si не зависит от конструкции буферного слоя, а определяется ростовыми условиями GaN. Показано, что применение ступенчатых буферных слоёв AlGaIn приводит к более высокому кристаллическому с

овершенству свободных от трещин слоёв GaN-on-Si и к меньшим остаточным напряжениям растяжения в них, по сравнению с применением буферного слоя с интеркалированным слоем AlN, для слоёв GaN-on-Si выращиваемых методом NH<sub>3</sub>-MBE.

Существенной технологической проблемой при росте A<sub>3</sub>-нитридных слоёв на подложках Si(111) является растрескивание эпитаксиальных пле-



нок в процессе постростового охлаждения. Природа данной проблемы непосредственно связана с несоответствием параметров кристаллических решеток Si(111) и  $A_3$ -нитридов ( $\sim 18\%$ ), а также с различием коэффициентов термического расширения (КТР) ( $\sim 33\%$ ) [5], и, как следствие, приводящих к образованию в эпитаксиальном слое дефектов высокой плотности различной природы включая образование трещин. Механизм образования трещин в слоях GaN-on-Si хорошо проиллюстрирован в работе [1]. В данной работе было исследовано влияние процесса нитридации и конструкции буферного слоя на процесс образования трещин в слоях GaN-on-Si.

Экспериментально установлено, что высокая температура нитридации, приводящая к формированию аморфной фазы SiN на поверхности кремниевой подложки, не позволяет выращивать свободные от трещин слои GaN-on-Si методом  $NH_3$ -МБЕ. Использование низкотемпературной нитридации кремния в комплексе с применением конструкций буферных слоёв с интеркалированным слоем AlN или с переходными ступенчатыми слоями AlGaIn со ступенчатым снижением состава по Al, позволяет выращивать свободные от трещин слои GaN-on-Si (см. рис. 1).

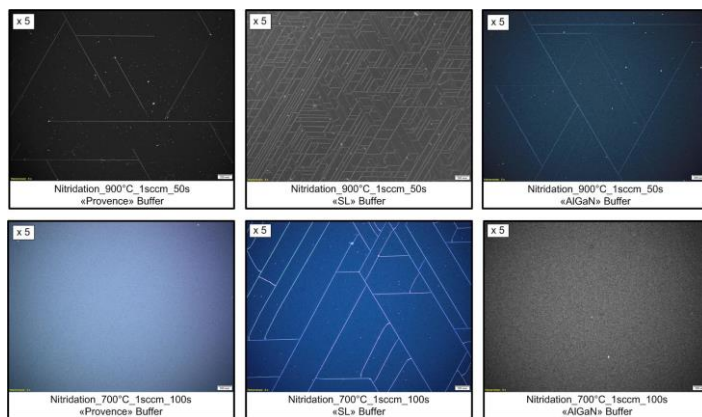


Рис. 1. Темнопольные изображения поверхности слоёв GaN-on-Si размером  $3,5 \times 2,5$  mm выращенных при разных условиях нитридации и с использованием различных конструкций буфера

Работа выполнена в рамках гос. задания № 242-2022-0015.

#### Литература

1. N. Watanabe, GaN-on-Si technology for high-power transistors, NTT Tech. Rev. 12 (4) (2014) 1–6. <https://www.ntt-review.jp/archive/index.html>.

**СТРУКТУРА И ДЕФЕКТЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК GaInAsBi, ВЫРАЩЕННЫХ  
НА ПОДЛОЖКАХ Si И GaAs**

*\*А.С. Пашченко<sup>1,2</sup>, О.В. Девицкий<sup>1,2</sup>, Л.С. Лунин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН  
Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, проспект Чехова, дом 41, e-mail: [semicondlab@ya.ru](mailto:semicondlab@ya.ru)

<sup>2</sup>Северо-Кавказский федеральный университет  
Россия, 355009, г. Ставрополь, проспект Кулакова, дом 2, e-mail: [v2517@rambler.ru](mailto:v2517@rambler.ru)

**STRUCTURE AND DEFECTS IN GaInAsBi THIN FILMS  
GROWN ON Si AND GaAs SUBSTRATES**

*\*A.S. Pashchenko<sup>1,2</sup>, O.V. Devitsky<sup>1,2</sup>, L.S. Lunin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences  
Russia, 344006 Rostov-on-Don, Chekhova avenue 41, e-mail: [semicondlab@ya.ru](mailto:semicondlab@ya.ru)

<sup>2</sup>North Caucasian Federal University  
Russia, 355009 Stavropol, Kulakova Avenue 2, e-mail: [v2517@rambler.ru](mailto:v2517@rambler.ru)

Growth of a thin GaInAsBi film was carried out on a Si and GaAs (001) substrates by pulsed laser deposition. Investigation of the real structure by transmission electron microscopy and X-ray diffractometry shows that stress relaxation occurred due to plastic shears by means of a nucleation of dislocations and a slip close-packed {111} planes, as well as twinning and a change in surface roughness. Using X-ray diffractometry, it was found that the GaInAsBi film on Si substrate has a lattice parameter of 5.856 Å, and on GaAs substrate – 5.848 Å. The results indicate the potential of the pulsed laser deposition for the epitaxial growth of multicomponent semiconductor alloys and demonstrate the feasibility of growing HMAs III–V–Bi compounds on silicon and GaAs substrates.

Тонкие пленки GaInAsBi представляют интерес для широкого спектра практических применений. Выращенные на подложках InP и GaAs, они могут использоваться в устройствах среднего инфракрасного диапазона, термоэлектрических и терагерцевых приборах, а также в системах телекоммуникаций [1–3]. Использование Si в качестве подложки для эпитаксиального роста имеет ряд преимуществ, таких как высокое качество, большую площадь и низкую стоимость по сравнению с подложками на основе соединений III–V группы [4]. Твердый раствор GaInAsBi на подложках Si и GaAs перспективен для нового класса материалов – сплавов с высокой степенью несоответствия элементов в составе (highly mismatched alloys (HMAs)) [5]. В этой связи целью работы являлось выращивание пленок GaInAsBi на подложках Si и GaAs (001) методом импульсного лазерного напыления (ИЛН) и изучение кристаллической структуры и дефектов.

Выращивание пленок GaInAsBi осуществлялось на экспериментальной установке ИЛН [6]. Результаты выращивания и исследования кристаллических свойств и дефектов в пленках GaInAsBi на подложках Si и GaAs (001) приведены на рис. 1.

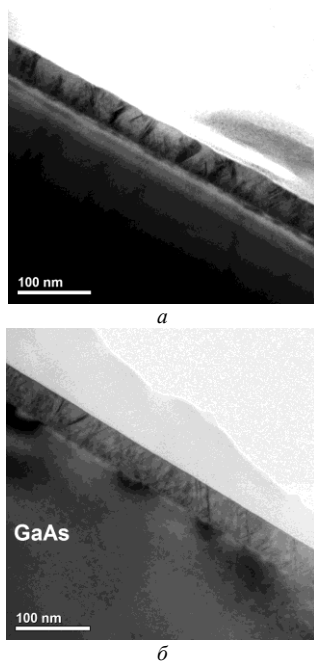


Рис. 1. Светлопольное ПЭМ-изображение пленки GaInAsBi на подложке: а) Si(001); б) GaAs(001)

Результаты РД и ПЭМ позволяют заключить, что пленка GaInAsBi на Si выращена в режиме Фольмера–Вебера и имеет выраженную текстуру в направлении роста [001]. В случае выращивания на GaAs удалось добиться эпитаксиального роста твердого раствора GaInAsBi. Исследование процессов релаксации и типов дефектов позволяют сделать вывод, что в гетеросистеме GaInAsBi – Si(GaAs) релаксация напряжений произошла за счет пластических сдвигов, через зарождение дислокаций и скольжение по плотноупакованным плоскостям {111}, а также через двойникование и изменение шероховатости поверхности.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциале метода ИЛН для эпитаксиального выращивания полупроводниковых твердых растворов III–V групп на подложках Si и GaAs.

Работа выполнена в рамках государственного задания Южного научного центра РАН (проект № 122020100326-7).

### Литература

1. Y. Zhong et al., Springer Ser. Mater. Sci., Springer. New York. (2013).
2. V. Pačebutas et al., J. Appl. Phys. **125**, 174507 (2019).
3. T. Hepp et al., J. Appl. Phys. **126**, 085707 (2019).
4. I. Lucci et al., Phys. Rev. Mater. **2**, 060401–1–6 (2018).
5. W. Walukiewicz, J. M. O. Zide. J. Appl. Phys. **127**, 010401 (2020).
6. A.S. Pashchenko et al., Thin Solid Films **743**, 139064 (2022).

**ДВУХПОЗИЦИОННОЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО  
ДЛЯ ТЕРМОМИГРАЦИИ ЖИДКИХ ЗОН В ПЛАСТИНАХ КРЕМНИЯ  
ДИАМЕТРОМ 100–150 мм**

*\*А.Н. Яценко<sup>1</sup>, Б.М. Середин<sup>1</sup>, В.П. Попов<sup>1</sup>, И.В. Гаврус<sup>1</sup>, А.А. Яковенко<sup>1</sup>, С.М. Логанчук<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет  
(НПИ) им. М. И. Платова

Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, дом 132, e-mail: [alexys-npi@yandex.ru](mailto:alexys-npi@yandex.ru)

**TWO-POSITION HEATING DEVICE FOR THERMOMIGRATION  
OF LIQUID ZONES IN SILICON WAFERS WITH DIAMETER 100–150 mm**

*\*A.N. Yatsenko<sup>1</sup>, B.M. Seredin<sup>1</sup>, V.P. Popov<sup>1</sup>, I.V. Gavrus<sup>1</sup>, A.A. Yakovenko<sup>1</sup>, S.M. Loganchuk<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Russia, 346428, Novocherkassk, Prosvescheniya ulitsa 132, e-mail: [alexys-npi@yandex.ru](mailto:alexys-npi@yandex.ru)

A heating device has been developed for the thermomigration process, providing a uniform temperature gradient field in silicon wafers with a diameter of up to 150 mm. The heating device uses a disk-shaped heating element, geometrically similar to a silicon wafer. Due to this, an improvement in the uniformity of the temperature gradient field and a significant reduction in heat losses are achieved. The heating device allows the thermomigration process to be carried out simultaneously on two silicon wafers located in identical temperature-time conditions. The proposed device has shown its effectiveness in thermal migration of a system of linear zones of complex configuration.

В технологии полупроводниковых приборов для управляемого получения сквозных легированных эпитаксиальных каналов используют метод термомиграции (ТМ) [1]. Для практической реализации этого метода необходимо нагревательное устройство (НУ), создающее в пластине кремния однородное поле температурного градиента. Высокие требования, предъявляемые к однородности этого поля, наряду с необходимостью в одном технологическом процессе проводить ТМ на нескольких пластинах, делают разработку НУ нетривиальной задачей, как в физическом, так и в техническом плане.

Известны конструкции многопозиционных НУ, позволяющих производить процесс ТМ на пластинах кремния диаметром 32 и 76 мм [2, 3]. Однако эти установки оказались непригодными для пластин большего диаметра, ввиду недостаточной однородности градиента температуры, сложности юстировки конфигурации температурного поля и тепловыми потерями.

В работе [4] предложена конструкция НУ, обеспечивающего однородное поле температурного градиента на пластинах кремния 100 мм с нагревательным элементом прямоугольной формы. В данной работе проведена модернизация предложенного в [4] НУ.

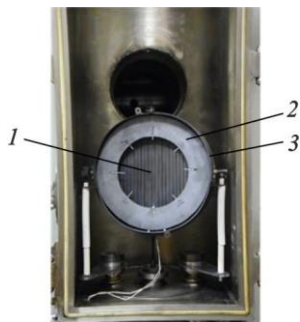


Рис. 1. НУ для пластин кремния диаметром 100–150 мм.

1 – нагревательный элемент, 2 – фронтальный экран, выполняющий также роль держателя пластины кремния, 3 – корпус

Модернизация заключается в использовании нагревательного элемента дисковой формы, подобного пластине кремния. При этом достигается улучшение однородности поля температурного градиента и снижение тепловых потерь ( $\approx$  на 20 %). На рис. 1 показано НУ, размещенное вертикально в водоохлаждаемой вакуумной установке Редмет-8. Процесс ТМ проводят на двух пластинах кремния одновременно, за счет чего достигается увеличение производительности НУ. Эти пластины симметрично расположены с обеих сторон нагревательного элемента и поэтому проходят одинаковую температурно-временную обработку. Предложенное НУ показало свою эффективность при ТМ системы линейных зон сложной конфигурации на пластинах кремния до 150 мм. Так, на таких пластинах выполняли синхронную миграцию 868 линейных зон в форме изолированных квадратов с процентом выхода годных структур 99 %.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ЮРГПУ (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. – 233 с.
2. Лозовский, В. Н. Многопозиционный способ вертикальной жидкостной эпитаксии / В.Н. Лозовский, Н. И. Даровский, А. В. Балюк // Электронная техника. Серия 7. Технология и организации производства и оборудования. – 1983. – Вып. 3 (118). – С. 13–14.
3. Оборудование для получения кремниевых структур методом термомиграции. В.Н. Лозовский, Б.М. Середин, А.С. Полухин, А.И. Солодовник. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2015. №5 (239). С. 65–76.
4. Создание однородного поля температурного градиента для реализации метода термомиграции в кремнии. Середин Б.М., Попов В.П., Заиченко А.Н., Малибашев А.В., Гаврус И.В., Минцев А.А., Скиданов А.А. // Физика твердого тела, 2023, том 65, вып. 12.

**ГЕНЕРАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ВОЛЬФРАМА И ИХ СОЕДИНЕНИЙ  
С ПОМОЩЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**\*С.В. Дианов<sup>1</sup>, Я.В. Ульянов<sup>1,2</sup>, Е.Д. Тараканов<sup>1</sup>, А.В. Рудый<sup>2</sup>, Е.И. Маврешко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Государственный лазерный полигон «Радуга»

Россия, 600910, г. Радужный, а/я 771, e-mail: [raduga@trassa.org](mailto:raduga@trassa.org)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

**GENERATION AND BREAKING DOWN TUNGSTEN NANOPARTICLES  
AND THEIR COMPOUNDS USING FEMTOSECOND LASER RADIATION**

**\*S.V. Dianov<sup>1</sup>, Y.V. Ulyanov<sup>1,2</sup>, E.D. Tarakanov<sup>1</sup>, A.V. Rudyi<sup>2</sup>, E.I. Mavreshko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> State laser polygon «Raduga»

Russia, 600910 Raduzhnyi, p.o. box771, e-mail: [raduga@trassa.org](mailto:raduga@trassa.org)

<sup>2</sup> National research nuclear university «MEPhI»

Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe Highway 31, e-mail: [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

Study of the process of formation of tungsten nanoparticles and its compounds as a result of laser ablation of targets in a liquid. During the work, experimental studies were carried out on the synthesis of nanoparticles under the influence of femtosecond laser radiation on a volumetric tungsten target in a medium of water, ethyl alcohol and acetone. These results have potential applications in industrial processes, especially for improving the mechanical properties of aluminum alloys through the incorporation of tungsten nanoparticles.

Целью исследования является получение наночастиц вольфрама и их соединений путём лазерной абляции мишеней в жидкой среде. Внимание уделяется пониманию того, как характеристики получаемых наночастиц изменяются в зависимости от параметров фемтосекундного лазерного излучения и окружающей среды. Была разработана установка и проведена серия экспериментов по синтезу наночастиц при различных сочетаниях параметров лазера и условий окружающей среды. Основным техническим решением стала фемтосекундная лазерная система ТЭТА-10. Характеризацию наночастиц, полученных методом лазерной абляции, проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta 200 3D [1–2].

Синтез наночастиц заключался в удалении материала с поверхности вольфрамовой мишени в форме параллелепипеда 40x40x5 мм с использованием излучения фемтосекундной лазерной системы ТЭТА-10 [3]. В качестве активной среды в данной системе используется кристалл вольфрамата калия-гадолиния, легированный ионами трехвалентного иттербия. Лазерная система работала на длине волны 1029 нм, длительности импульса 300 фс, частоте повторения импульсов 10 кГц и максимальной энергии импульса

150 мкДж. В качестве жидких сред были выбраны дистиллированная вода, этиловый спирт и ацетон из-за их склонности к образованию различных составов наночастиц вольфрама: оксида вольфрама в воде, карбида вольфрама в ацетоне и наночастиц вольфрама в этиловом спирте. В этиловом спирте в результате лазерной абляции при средней мощности 1 Вт были получены наночастицы размером от 20 до 200 нм со средним размером около 75 нм. Уменьшение мощности лазера до 0,5 Вт привело к образованию наносфер преимущественно размером от 40 до 150 нм. Лазерная фрагментация привела к образованию более мелких наносфер (< 20 нм) и коллоидного раствора, оставив нетронутыми некоторые более крупные наносферы (от 30 до 60 нм).

В результате абляции в ацетоне были получены сферические наночастицы диаметром от 20 до 180 нм при мощности 1 Вт и от 20 до 150 нм при мощности 0,5 Вт. Лазерная фрагментация уменьшила размеры наночастиц, аналогично результатам, наблюдаемым в этиловом спирте. В результате лазерной абляции образовался коллоидный раствор, образующий при высыхании гелевую пленку, что свидетельствует о наночастицах очень малых размеров (около 1 нм). При мощности 1 Вт наблюдались отдельные наносферы размером от 60 до 100 нм с тенденцией к образованию конгломератов размером до 300 нм. Снижение мощности до 0,5 Вт привело к получению более крупных наноструктур (от 250 нм до 1 мкм) и конгломератов до 10 мкм.

Спектрофотометрия выявила снижение коэффициента поглощения при лазерно-индуцированной фрагментации коллоидных растворов. Эти результаты имеют потенциальное применение в промышленных процессах, особенно для улучшения механических свойств алюминиевых сплавов за счет включения наночастиц вольфрама.

#### **Литература**

1. Кочуев Д. А. Влияние давления и электрического поля на динамику синтеза микро- и наночастиц при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов на поверхность материала в жидких и газовых средах: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – Москва, 2021. – 20 с.
2. Мацукевич И. В., Крутько Н. П., Липай Ю. В., Овсенко Л. В. Наноконпозиционные материалы на основе оксида магния и металлических наночастиц // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 33-41.
3. Фемтосекундная лазерная система ТЕТА-10: Паспорт. – Москва, Троицк: ООО «АВЕСТА», 2010. – 14 с.

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ HgCdTe  
ДЛЯ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ  
ДЛИННОВОЛНОВОГО ИК ДИАПАЗОНА**

***А.А. Трофимов<sup>1</sup>, И.А. Денисов<sup>2</sup>, Ю.Б. Андрусов<sup>2</sup>, М.Б. Гришечкин<sup>2</sup>, Д.О. Царегородцев<sup>1</sup>,  
А.М. Косякова<sup>1</sup>, В.Е. Антонова<sup>1</sup>, К.А. Гладышева<sup>1</sup>, М.Ю. Андреева<sup>3</sup>***

<sup>1</sup>ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия, e-mail: [aa-trofimov@yandex.ru](mailto:aa-trofimov@yandex.ru)

<sup>2</sup>АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт  
редкометаллической промышленности «Гиредмет» им. Н.П. Сажина, Москва, Россия

<sup>3</sup>РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

**ACTUAL STATUS AND DEVELOPMENT POTENCIAL HgCdTe FOR LWIR FPA**

***A.A. Trofimov<sup>1</sup>, I.A. Denisov<sup>2</sup>, Yu.B. Andrusov<sup>2</sup>, M.B. Grishechkin<sup>2</sup>, D.O. Tsaregorodtsev<sup>1</sup>,  
A.M. Kosyakova<sup>1</sup>, V.E. Antonova<sup>1</sup>, K.A. Gladysheva<sup>1</sup>, M.Yu. Andreeva<sup>3</sup>***

<sup>1</sup>Orion R&P Association, JSC, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Sazhin Giredmet JSC, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russia

HgCdTe is one of the main material for LWIR FPA. To realize the full potential of HgCdTe, a defect-free surface of this material is required. This depends both on the substrate and the preparation of its surface, and can be achieved by polishing the HgCdTe layer. The MBE method provides high quality morphology of the HgCdTe surface when using an isotope CdZnTe (211)B substrates. At JSC Orion R&P Association work continues to improve the technology for preparing CdZnTe substrates. Work is also underway to obtain an improved surface of HgCdTe layers grown by LPE in Sazhin Giredmet JSC.

Теллурид кадмия-ртути (HgCdTe) является одним из основных материалов для производства матричных фотоприемных устройств длинноволнового инфракрасного диапазона (ИК МФПУ), которые крайне востребованы для широкого спектра применений [1, 2]. Благодаря фундаментальным свойствам HgCdTe обеспечиваются высокая квантовая эффективность, высокая обнаружительная способность и чувствительность при производстве ИК МФПУ, что повышает пространственное разрешение тепловизионного канала, тем самым обеспечивая повышение дальности обнаружения и распознавания [2].

Для полной реализации потенциала HgCdTe необходима бездефектная поверхность этого материала [3]. На морфологию поверхности эпитаксиальных слоев HgCdTe влияют как ростовые условия, так и подготовка поверхности подложки. В АО «НПО «Орион» в рамках развития технологии и освоения производства подложек CdZnTe диаметром 50,8 мм, предназначенных для эпитаксиального выращивания HgCdTe методом МЛЭ [4] продолжается работа по улучшению технологии подготовки таких подложек,



изготовленных из слитков, выращенных методом Бриджмена в АО «Гиредмет» [5–7], при этом концентрация Zn составляет 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]. В настоящее время показатели качества подготовки подложек CdZnTe (211)В следующие: разнотолщинность (TTV) на диаметре 50,8 мм, составляет  $\leq 1,5$  мкм; шероховатость поверхности, измеренная методом атомно-силовой микроскопии, составляет  $RMS = 0,5$  нм, на длине 7 мкм. Морфология поверхности подложки CdZnTe представлена на рис. 1.

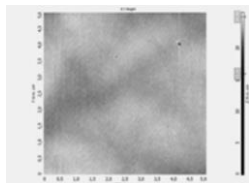


Рис. 1. Морфология поверхности CdZnTe. Размеры участка  $5 \times 5$  мкм

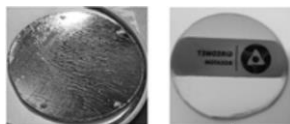


Рис. 2. HgCdTe на CdZnTe после эпитаксиального роста (а) и полированный (б)

В АО «Гиредмет» на подложках CdZnTe выращивается HgCdTe методом жидкофазной эпитаксии [10, 11], однако во время процесса эпитаксиального роста на поверхности образуются различные виды структурных дефектов, которые являются основным источником поверхностной составляющей высокого тока утечки. Поверхность HgCdTe требует прецизионного доведения и получения морфологии с шероховатостью поверхности на уровне 1 нм (рис. 2).

## 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 приборам ночного видения (г. Москва, АО «НПО «Орион»), 2022 г, 475 с.
3. Mohd Qasim, P. Parthiban, 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. М. В. Grishechkin, I. A. Denisov, A. A. Silina, et. al., *Non-Ferrous Metals*, No. 2, 23 (2016).
7. Гришечкин М.Б., Денисов И.А., Силина А.А., и др. // Цветные металлы, 2016, № 12.
8. Кульчицкий Н.А., Наумов А., Старцев В. // Электроника: НТБ, 2020, № 6, с. 114–121.
9. Сенченков А.С. // Успехи прикладной физики, 2021, т. 9, № 5, с. 402–409.
10. Ю.Б. Андрусов, А.Г. Белов, и др. // Цветные металлы, 2016, № 12, с. 56–62.
11. Патент РФ №2602123 от 30.12.2015.

**АНАЛИЗ ПОЛИРОВАННЫХ ПЛАСТИН Ge ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР  
GaInP/GaAs/Ge**

*\*В.А. Малыгин<sup>1</sup>, А.М. Косякова<sup>1</sup>, А.Е. Гончаров<sup>1</sup>, К.А. Гладышева<sup>1</sup>,  
Т.В. Кулаковская<sup>2</sup>, Д.В. Топаков<sup>2</sup>, А.А. Трофимов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Россия, 111538, г. Москва, Косинская улица, дом 9  
e-mail: [mva1431@yandex.ru](mailto:mva1431@yandex.ru)

<sup>2</sup>АО «Германий», Россия, 660123, г. Красноярск, Транспортный проезд, дом 1

**ANALYSIS OF POLISHED Ge SUBSTRATES FOR PHOTOELECTRIC CONVERTERS  
BASED ON EPITAXIAL STRUCTURES GaInP/GaAs/Ge**

*\*V.A. Malygin<sup>1</sup>, A.M. Kosyakova<sup>1</sup>, A.E. Goncharov<sup>1</sup>, K.A. Gladysheva<sup>1</sup>,  
T.V. Kulakovskaya<sup>2</sup>, D.V. Topakov<sup>2</sup>, A.A. Trofimov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Orion R&P Association, JSC, Russia, 111538, Moscow, Kosinskaya st. 9

<sup>2</sup>Germanium, JSC, Russia 660027, Krasnoyarsk, Transportny proezd 1

Germanium is one of the most important strategic rare metals. It transmits radiation in the range of 2–16 microns and has a high refractive index, which makes it possible to obtain high optical power of devices in the range of 8–12 microns. Currently, the application of germanium shows great potential in solar energy. In recent years, cooperation between JSC Germanium and Orion R&P Association in terms of quality research of Ge plates and correction of technological processes has led to an improvement in the parameters of the products obtained.

Германий – один из важнейших стратегических редких металлов [1]. Одним из крупнейших производителей германиевой продукции в России и в мире является компания АО «Германий» (г. Красноярск) холдинга АО «Швабе», обладающая полным производственным циклом, начиная с гидрометаллургического процесса разложения исходного сырья до получения следующей продукции.

Основным видом бортовых энергоустановок на подавляющем большинстве существующих и разрабатываемых в нашей стране и за рубежом космических аппаратов являются солнечные батареи с полупроводниковыми фотоэлектрическими преобразователями на основе германия [2], [3].

Для изготовления таких подложек требуются монокристаллы германия с повышенными требованиями к структурным характеристикам. В условиях жестких санкционных ограничений и необходимости развития отечественных наукоемких технологий для обеспечения импортозамещения и технологического суверенитета страны, в рамках технологического сотрудничества АО «НПО «Орион» проводит исследования опытных партий германи-

евых подложек производства АО «Германий» с помощью имеющегося аналитического оборудования, что позволяет по полученным результатам оперативно корректировать технологические процессы, обеспечивая стабильное повышение качества и увеличение выхода годных полированных 100 мм подложек Ge, не уступающих мировому уровню (рис. 1).

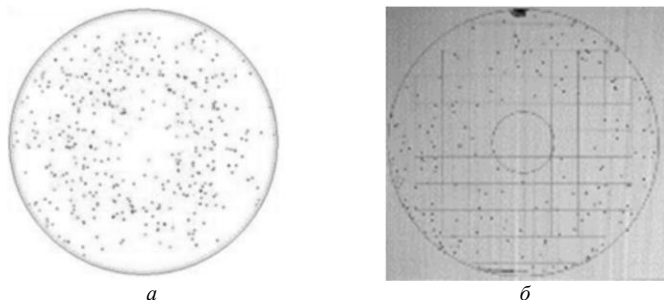


Рис. 1. Сравнение чистоты поверхности Ge пластин Umicore (Бельгия) (а) и АО «Германий» (б)

Применение результатов исследований и изменение технологического процесса изготовления германиевых пластин привело к увеличению эффективности фотопреобразования трехкаскадных солнечных элементов GaInP/GaAs/Ge, получаемых на отечественных пластинах Ge производства АО «Германий». Наблюдалась стабилизация всех основных электрических параметров солнечных элементов: плотности тока короткого замыкания, напряжения холостого хода. Достигнутое значение КПД (29 %) соответствует мировому уровню.

#### Литература

1. Claeys Cor L. Germanium-based technologies: from materials to devices/ L. Cor Claeys, E. Simoen – Berlin [etc.]: Elsevier, 2007.
2. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики/Физика и техника полупроводников, 2004, том 38, вып. 8.
3. Скачков А.Ф. Состояние и перспектива развития многокаскадных солнечных элементов космического назначения/А.Ф. Скачков, Г.И. Юрко//Перспективные системы и задачи управления: материалы Всерос.научно-прак.конф. (Ростов-на-Дону, 6–10 апреля 2015 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015, т. 2.

### ПОДГОТОВКА ПОДЛОЖЕК InSb ДЛЯ МЛЭ

*А.А. Трофимов<sup>1</sup>, Р.Ю. Козлов<sup>2,3</sup>, В.С. Кривобок<sup>1,4</sup>, \*В.А. Улькаров<sup>1</sup>, Е.В. Молодцова<sup>2</sup>, П.В. Павлов<sup>2</sup>, О.С. Павлова<sup>2</sup>, А.М. Косякова<sup>1</sup>, Н.Ю. Комаровский<sup>2,3</sup>, М.С. Нестюркин<sup>2,3</sup>, А.В. Клековкин<sup>4</sup>, И.И. Минаев<sup>4</sup>, В.В. Ерошенков<sup>1</sup>, А.С. Атрашков<sup>1</sup>, Я.А. Ковин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия, e-mail: [ulkarov@yandex.ru](mailto:ulkarov@yandex.ru)

<sup>2</sup>АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н.П. Сажина, Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

<sup>4</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

### DEVELOPMENT OF InSb SUBSTRATES FOR MBE

*A.A. Trofimov<sup>1</sup>, R.Yu. Kozlov<sup>2,3</sup>, V.S. Krivobok<sup>1,4</sup>, V.A. Ul'karov<sup>1</sup>, E.V. Molodtsova<sup>2</sup>, P.V. Pavlov<sup>2</sup>, O.S. Pavlova<sup>2</sup>, A.M. Kosyakova<sup>1</sup>, N.Yu. Komarovskiy<sup>2,3</sup>, M.S. Nestyurkin<sup>2,3</sup>, A.V. Klekovkin<sup>4</sup>, I.I. Minaev<sup>4</sup>, V.V. Eroshenkov<sup>1</sup>, A.S. Atrashkov<sup>1</sup>, Ya.A. Kovin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Orion R&P Association, JSC, Moscow, Russia

<sup>2</sup>N.P. Sazhin Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), Russia

<sup>3</sup>National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

<sup>4</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

InSb is one of the popular materials for the production of IR FPA, including type II superlattices using the MBE method. In Russia, InSb ingots are grown, but the production of polished wafers intended for epitaxial processes has not been mastered. In the course of joint work, the Orion R&P Association and JSC Giredmet are developing a technology for producing polished InSb wafers. Technological testing by performing epitaxial growth using the MBE method on prepared InSb substrates was carried out at the P.N. Lebedev Physical Institute of RAS. As a result of the epitaxial process, an InAsSb layer with a thickness of 700 nm with satisfactory surface morphology and roughness was successfully grown on a prepared InSb substrate.

Бинарное соединение антимонид индия (InSb) является одним из востребованных для производства матричных фотоприёмных устройств средневолнового (3–5 мкм) инфракрасного диапазона (ИК МФПУ) широкого спектра применений и остаётся стратегическим материалом, устойчивое производство которого формирует один из аспектов технологического суверенитета и обороноспособности государства [1, 2]. В России серийное выращивание монокристаллических слитков InSb диаметром 50,8 мм, а также их первичная постростовая обработка, успешно осуществляются в АО «Гиредмет» [3–6]. Для изготовления ИК МФПУ на основе InSb отечественное производство полированных пластин этого материала не освоено

[7, 8]. Однако, становится все более актуальным и перспективным выращивание методом МЛЭ короткопериодных сверхрешеток II рода (T2SL) для создания ИК МФПУ [9–11]. Для осуществления таких эпитаксиальных процессов требуются подготовленные полированные подложки InSb и GaSb. Метод МЛЭ предъявляет высокие требования к качеству подготовки поверхности подложек [12, 13]. Лидирующими мировыми производителями полированных подложек InSb различной кристаллографической ориентации и диаметром вплоть до 125 мм являются компании WaferTech (Великобритания) и Ram-Xiamen (Китай) [14, 15]. В РФ в настоящий момент серийное производство полированных пластин InSb не осуществляется, а в связи с санкционными ограничениями спрос на такие пластины, предназначенные для проведения эпитаксиальных процессов, сохранился. Таким образом, задача получения отечественного подложечного InSb, удовлетворяющего требованиям МЛЭ является актуальной. В ходе совместных работ ГНЦ АО «НПО «Орион» и АО «Гиредмет» ведется разработка технологии получения полированных пластин InSb, предназначенных для проведения эпитаксиальных процессов методом МЛЭ [7, 16].

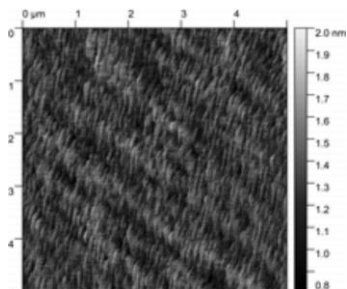


Рис. 1. Морфология эпитаксиального слоя InAsSb с содержанием As 0.007 %, выращенного на подготовленной в рамках совместных работ подложке InSb

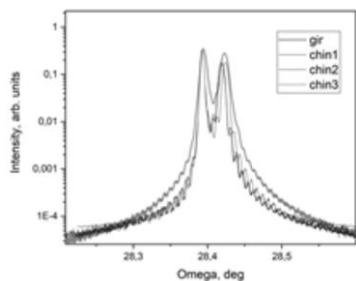


Рис. 2. Рентгеновская кривая качения эпитаксиального слоя In(As)Sb на подложке InSb и аналогичных слоев на китайских подложках (Chin). Правый пик соответствует эпитаксиальному слою In(As)Sb с содержанием As 0.007 %

В результате проведения эпитаксиального процесса на подготовленной подложке InSb успешно выращен слой InAsSb толщиной

$\approx 700$  нм с удовлетворительной морфологией поверхности и шероховатостью (рис. 1). Структурные исследования эпитаксиальных слоев проводились на рентгеновском дифрактометре Panalytical X'Pert Pro MRD Extended. Из анализа рентгеновских кривых (рис. 2) видно, что эпитаксиальные слои InAsSb, выращенные методом МЛЭ на подложке из InSb из слитка, выращенного методом Чохральского в АО «Гиредмет», и подготовленной к эпитаксиальным процессам в рамках совместных работ с АО «НПО «Орион» и ФИАН, по качеству практически не уступают полированным подложкам компании Ram-Xiamen (Китай).

В результате проведенных работ в рамках импортозамещения и обеспечения технологической независимости РФ в части стратегического материала твердотельной оптоэлектроники исследована возможность получения из отечественного InSb, выращенного методом Чохральского в АО «Гиредмет», пластин-подложек, удовлетворяющих требованиям МЛЭ для проведения эпитаксиальных процессов.

В ходе совместных работ разработана лабораторная технология подготовки подложек InSb, которая при необходимости может быть эффективно применена для мелкосерийного выпуска такой продукции. В настоящее время на основе разработанной лабораторной технологии завершается разработка промышленной технологии получения полированных пластин в АО «Гиредмет».

Проведенная в ФИАН им. П.Н. Лебедева технологическая апробация подготовленных пластин-подложек InSb показала возможность успешного проведения на таких подложках эпитаксиальных процессов методом МЛЭ с удовлетворительным качеством получаемого тестового эпитаксиального слоя. Некоторое снижение параметров, характеризующих кристаллическое совершенство материала, в сравнении с подложками Ram-Xiamen (Китай) может свидетельствовать о необходимости дальнейшего совершенствования не только технологии подготовки подложек, но и самого подложечного материала, что обусловлено как чистотой исходных компонентов для выращивания монокристаллических слитков InSb, так и технологией их роста, что в свою очередь показывает необходимость комплексного подхода в развитии технологий и оборудования электронной промышленности РФ.

#### **Литература**

1. Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Кузнецов С.А., Пономаренко В.П // материалы XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (г. Москва, АО «НПО «Орион»), 2022 г, 475 с.
2. Д.Л. Балиев, К.О. Болтарь, и др. Матричное фотоприемное устройство на основе антимонида индия формата 640×512 с шагом 15 мкм // Прикладная физика 2014, № 2, 41–44.
3. Патент РФ №2482228 от 20.05.2013, Бюл. № 14.

4. Комаровский Н.Ю., Молодцова Е.В., Белов А.Г., Гришечкин М.Б., Козлов Р.Ю., и др. Исследование монокристаллов антимонида индия, полученных модернизированным методом Чохральского в различных кристаллографических направлениях. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023;89(8):38-46.
5. Н.Ю. Комаровский, Е.В. Молодцова, А.А. Трофимов, С.С. Кормилицина, В.А. Улькаров, М.С. Нестюркин, А.А. Зареченская, Д.О. Царегородцев. Исследование зависимости прочностных характеристик монокристаллического InSb от кристаллографической ориентации и условий роста // Прикладная физика, 2023, №3, с. 63-72.
6. Р.Ю. Козлов, С.С. Кормилицина, Е.В. Молодцова, Е.О. Журавлев. Выращивание монокристаллов антимонида индия диаметром 100 мм модифицированным методом Чохральского // Известия вузов. Материалы электронной техники, 2021, Т. 24, № 3, 190–198.
7. Е.В. Мирофянченко, А.Е. Мирофянченко, В.С. Попов//Прикладная физика. 2020. № 2 46.
8. Л.В. Киселева, А.А. Лопухин, Ю.С. Мезин, и др. // Прикладная физика 2015. № 5. С. 84.
9. В.С. Ковшов, А.В. Никонов, Д.А. Пашкеев, Е.А. Лопатина. Современное состояние разработок и исследований сверхрешеток II типа для приборов ИК-фотоэлектроники (обзор) // Прикладная физика. 2021. № 2. С. 97–111.
10. В.П. Пономаренко, Квантовая фотосенсорика // АО «НПО «Орион», Москва, 2018.
11. D.Z. Ting, S.B. Rafol, A. Khoshakhlagh, A. Soibel, S.A. Keo, A.M. Fisher, B.J. Pepper, C.J. Hill, and S. D. Gunapala, *Micromachines* 11 (11), 958 (2020).
12. Суханов М.А., Бакаров А.К., Протасов Д.Ю., Журавлёв К.С. AllInSb/InSb гетероструктуры для ИК-фотоприемников, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Письма в ЖТФ, 2020, том 46, выпуск 4, 3–6.
13. Петрушков М.О., Абрамкин Д.С., Емельянов Е.А., Путьто М.А., Васев А.В., Лошкарев И.Д., Есин М.Ю., Комков О.С., Фирсов Д.Д., Преображенский В.В. Влияние кристаллографической ориентации пленок GaSb на их структурные свойства при гетероэпитаксии на видинальных подложках Si(001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Физика и техника полупроводников, 2020, том 54, выпуск 12, 1289–1295.
14. Wafer Technology Ltd. URL: <http://www.wafertech.co.uk/>
15. Xiamen PAM Co, Ltd. <https://www.powerwaywafer.com/compound-semiconductor>
16. И.Д. Размахнин, В.А. Улькаров. Перспективы повышения эффективности серийного производства МФЧЭ на основе InSb в результате оптимизации технологии на участке шлифования и полирования // XI научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Москва, 2022.
17. В.С. Кривобок, Д.А. Пашкеев, А.В. Клековкин, И.И. Минаев, К.А. Савин, Г.Н. Ерошенко, А.Е. Гончаров, С. Н. Николаев. Разработка дизайна интерфейсов для получения короткопериодных сверхрешеток InAs/GaSb методом молекулярно-пучковой эпитаксии // Краткие сообщения по физике, 2023, том 9, 51-60.
18. В.С. Кривобок, С.Н. Николаев, Д.А. Пашкеев, И.И. Минаев, К.А. Савин, Г.Н. Ерошенко, А.В. Клековкин. Получение XВn структур на основе InSb методом молекулярно-пучковой эпитаксии // Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (БПИО-2023). Москва 2023.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КРАЯ ПОГЛОЩЕНИЯ  
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК CdTe *in situ* ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

**\*А.А. Грекова<sup>1,2</sup>, Е.А. Климов<sup>1</sup>, А.С. Суханова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-производственное объединение «ОРИОН»»

Россия, 111538, г. Москва, ул. Косинская, д. 9, e-mail: [ingo.tyan2@mail.ru](mailto:ingo.tyan2@mail.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

**DETERMINATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE ABSORPTION  
EDGE OF EPITAXIAL CdTe FILMS IN SITU BY THE ELLIPSOMETRIC METHOD**

**\*A.A. Grekova<sup>1,2</sup>, E.A. Klimov<sup>1</sup>, A.S. Sukhanova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Orion R&P Association, JSC

Russia, 111538, Moscow, ul. Kosinskaya 9, e-mail: [ingo.tyan2@mail.ru](mailto:ingo.tyan2@mail.ru)

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»

Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse 31

CdHgTe structures (MCT) are actively used in thermal imaging devices, so the technology for their production is a pressing task at the present time. MCT structures can be synthesized by molecular beam epitaxy on alternative silicon substrates through a thick CdTe matching buffer layer. To obtain high-quality single-crystal films, it is necessary to use non-destructive control methods throughout the entire growth cycle. One such control method is ellipsometry. Based on the obtained ellipsometric spectra, it is possible to control such important technological parameters as the temperature of the growing layer and its composition. In this work study the temperature dependence of the red absorption edge of CdTe/Si structures is investigated.

В настоящее время молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) является наиболее подходящим способом получения структур кадмий-ртуть-теллур (CdHgTe) на различных подложках. Ранее было установлено, что неразрушающим подходом *in situ* температурного и структурного контроля является эллипсометрический метод [1]. В настоящей работе мы определяли температурную зависимость края поглощения буферного слоя CdTe на подложке кремния (Si) с помощью вышеуказанного метода.

Исследование проводилось с помощью спектрального эллипсометрического комплекса (*KЭС-1000*), прикрепленного к камере роста МЛЭ (*Riber*), где находился CdTe/Si. Основными измерениями в эллипсометрическом методе являются  $\psi$  и  $\Delta$  (отношение амплитуд и разность фаз двух компонент эллиптически поляризованного луча соответственно). Эксперимент был разделен на две части. Сначала в процессе исследования CdTe/Si постепенно нагревался с шагом 50 °C до конечного значения в 350°C, и на каждой



контрольной точке фиксировалось значение  $\psi$  и  $\Delta$  при определенной длине волны. При постоянной температуре 300°C образец выдерживался в течение двух часов. Время снятия одной экспериментальной точки составляло 3 секунды.

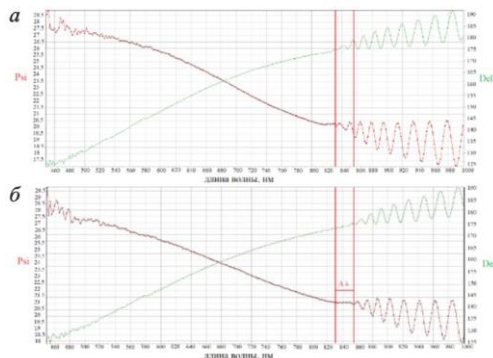


Рис. 1. Зависимость  $\psi$ ,  $\Delta$  от длины волны. а) – при температуре 50 °С; б) – при температуре 250 °С. Край поглощения в первом случае (50 °С) равен 831,72 нм, а во втором (250 °С) равен 867,78 нм. Таким образом, край поглощения сместился на  $\Delta\lambda = 36,06$  нм

Полученные эллипсометрические зависимости показаны на рисунке 1 (а, б). Наибольший интерес представляет прозрачная область, где осцилляции с монотонно возрастающей амплитудой начинаются с длины волны, соответствующей краю поглощения. Размах интерференционных осцилляций зависит от величины показателя преломления в CdTe. Видно, что при приближении к краю поглощения амплитуда уменьшается. Этот факт может быть связан с неоднородностью толщины слоя по площади образца или же с ростом поглощения на дефектах кристаллической структуры [2]. Как проиллюстрировано на рисунке 1 (б), при увеличении температуры начало осцилляций смещалось в длинноволновую область. Значение смещения  $\Delta\lambda$  равно, в среднем, 4,75 нм.

Таким образом, была определена температурная зависимость края поглощения для структуры CdTe с помощью *in situ* эллипсометрического метода. Мы выяснили, что данный способ является чувствительным к структурным изменениям растущих слоев.

#### Литература

1. Свиташев К.К. и др., Ж. Технической физики, **65**, 110-120 (1995).
2. Швец В.А. и др., Физика и техника полупроводников, **57**, 469-475 (2023).

**ЭПИТАКСИЯ РЕЛАКСИРОВАННЫХ ПЛЁНОК GaN НА ПОДЛОЖКАХ КРЕМНИЯ  
МЕТОДОМ АММИАЧНОЙ МЛЭ**

*\*Е.М. Колобкова, И.С. Езубченко, М.Л. Занавескин*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
Россия, 123182, г. Москва, площадь Академика Курчатова, дом 1  
e-mail: [Kolobkova\\_EM@nrcki.ru](mailto:Kolobkova_EM@nrcki.ru)

**THE EPITAXY OF STRAIN-RELAXED GaN FILMS  
ON SILICON (111) SUBSTRATES BY AMMONIA MBE**

*\*E.M. Kolobkova, I.S. Ezubchenko, M.L. Znaveskin*

The National Research Center Kurchatov Institute  
Russia, 123182 Moscow, 1 Kurchatov Square, e-mail: [Kolobkova\\_EM@nrcki.ru](mailto:Kolobkova_EM@nrcki.ru)

The heterostructures with two-dimensional electron gas (2DEG) and high crystalline quality are presented. The selection of growth conditions for the initial layers and the architecture of buffer layers and inserts compensated for tensile stresses with compressive ones and prevented cracking of structures. As a result, the heterostructure had no cracks and had the following 2DEG characteristics: sheet resistance 312 Ohm/□, majority carrier concentration  $1.27 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , with a mobility of  $1575 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ .

Гетероструктуры на основе GaN, AlN и их твердых растворов востребованы в индустрии транзисторов с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) для различных применений. Исследования показывают, что в технологии эпитаксии нитридных гетероструктур их кристаллическое качество зависит от условий роста начальных слоёв [1]. При использовании кремния в качестве подложки для синтеза нитридных плёнок в установках аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на начальном этапе требуется процесс нитридации поверхности Si с образованием  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  [2]. Контроль этого процесса в условиях остаточной атмосферы аммиака затруднён. Также качество GaN/Si гетероструктур сильно зависит от рассогласования их коэффициентов термического расширения. В процессе охлаждения пластины после роста вызывает растягивающее напряжение в нитридных плёнках, способное сильно изогнуть образцы и вызвать растрескивание гетероструктуры. Подбор условий роста начальных слоёв и архитектуры буферных слоёв и вставок компенсирует растягивающие напряжения сжимающими и предотвращает растрескивание структур.

Целью данной работы стала разработка методики роста методом аммиачной МЛЭ нитридных гетероструктур на кремнии, обладающих высокими

значениями параметров двумерного электронного газа (ДЭГ) и кристаллическим качеством.

Определение качества плёнки осуществлялось методами атомно-силовой и растровой электронной микроскопии. Электрофизические свойства были измерены четырёхзондовым методом ван дер Пау.

Определены условия контролируемого процесса нитридации поверхности кремния при парциальных давлениях аммиака до  $3 \cdot 10^{-5}$  Торр. Показано, что растягивающие напряжения в нитридных плёнках можно скомпенсировать сжимающими, накопленными с помощью архитектуры с тремя последовательно выращенными вставками состава  $\text{AlN} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} - \text{Al}_{0,11}\text{Ga}_{0,89}\text{N}$ , где мольная доля алюминия  $x$  в слое переменного состава менялась от 42,7 до 36,5 мол.% Al.

В результате гетероструктура не имела трещин, обладала следующими характеристиками ДЭГ: слоиое сопротивление  $312 \text{ Ом}/\square$ , концентрация основных носителей  $1,27 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  при подвижности  $1575 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

В дальнейшем на такой гетероструктуре были построены ТВПЭ, обладающие электрофизическими параметрами на уровне приборного качества, их вольт-амперные характеристики (ВАХ) изображены на рис. 1.

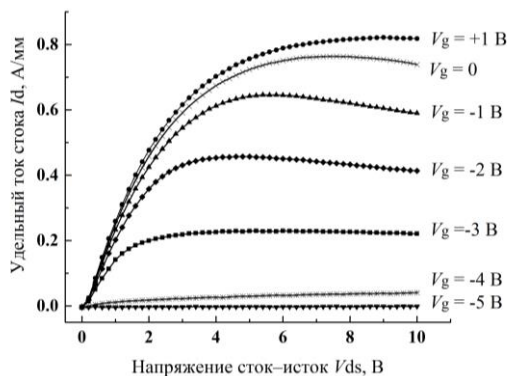


Рис. 1. ВАХ транзисторов GaN на кремнии

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

#### Литература

1. S. W. Kaun et al., *Semicond. Sci. Technol.*, **28**, 074001 (2013).
2. F. Medjdoub et al., *Appl. Phys. Express*, **4**, 12, 124101 (2011).

**ЭПИТАКСИАЛЬНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ EuO С GaAs  
ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ СПИНТРОНИКИ**

**\*Д.В. Аверьянов<sup>1</sup>, И.С. Соколов<sup>1</sup>, А.Н. Талденков<sup>1</sup>, О.А. Кондратьев<sup>1</sup>, А.Н. Виниченко<sup>2</sup>,  
И.С. Васильевский<sup>2</sup>, О.Е. Парфёнов<sup>1</sup>, А.М. Токмачёв<sup>1</sup>, В.Г. Сторчак<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт»

Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1, e-mail: [dm\\_averyanov@mail.ru](mailto:dm_averyanov@mail.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31

**EPITAXIAL INTEGRATION OF EuO WITH GaAs FOR SPINTRONIC ELEMENTS**

**\*D.V. Averyanov<sup>1</sup>, I.S. Sokolov<sup>1</sup>, A.N. Taldenkov<sup>1</sup>, O.A. Kondratev<sup>1</sup>, A.N. Vinichenko<sup>2</sup>,  
I.S. Vasil'evskii<sup>2</sup>, O.E. Parfenov<sup>1</sup>, A.M. Tokmachev<sup>1</sup>, V.G. Storchak<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute»

Russia, 123182, Moscow, Kurchatov Sq., 1, e-mail: [dm\\_averyanov@mail.ru](mailto:dm_averyanov@mail.ru)

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»

Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

Oxides and their heterostructures offer unique properties to design and advance electronic components. For applications, direct integration of oxides with mature semiconductor technological platforms is especially appealing.

Here, we focus on synthesis of the ferromagnetic semiconductor EuO on GaAs – a pivotal material of modern microwave and optoelectronic device industries. In the course of the work, the basic EuO growth modes were examined. A special approach to prepare an atomically flat substrate surface was developed and methods of its modification with Eu surface phases were tested. As a result, EuO films reached the best quality when synthesized employing weak distillation of Eu. RHEED and XRD measurements testify the epitaxial growth, atomically sharp interfaces and the absence of side products; magnetic and transport measurements suggest the films to be stoichiometric. The findings demonstrate high quality of the structures implying their potential use in GaAs-based spintronic devices.

Оксидные материалы и гетероструктуры на их основе обладают целым спектром уникальных свойств. Благодаря этому они рассматриваются в качестве систем, способных существенно расширить функциональность электронных компонентов. Значимым этапом для создания таких устройств является интеграция оксидных материалов с существующими полупроводниковыми платформами с развитой технологической базой.

Данная работа посвящена формированию гетероструктур на основе ферромагнитного полупроводника EuO. Этот материал обладает практиче-

ски 100 % спиновой поляризацией носителей заряда и, как следствие, считается перспективным для создания устройств спинтроники, в первую очередь, при использовании в качестве спинового инжектора. В недавнее время нашей группой были разработаны режимы формирования эпитаксиальных гетероструктур EuO/Si [1–3] и EuO/Ge [4]. В данной работе исследована возможность прямой (при отсутствии буферного слоя) интеграции EuO с одним из промышленно значимых материалов электроники – GaAs, широко применяемым в оптоэлектронике и СВЧ-электронике.

Синтез пленок производился методом МЛЭ путем осаждения Eu в потоке кислорода. В ходе работы изучена применимость основных режимов роста EuO: режим сильной дистилляции, режим слабой дистилляции и режим компенсации потоков. Разработан способ прямого эпитаксиального роста EuO/GaAs, включающий подготовку критически важной атомно-гладкой поверхности подложки, ее пассивацию для переноса между ростовыми камерами, исследованы возможности модификации поверхности путем формирования поверхностных фаз Eu и влияние поверхностных фаз на итоговое качество пленок EuO.

Установлено, что пленки EuO наилучшего качества формируются в режиме слабой дистилляции: соответствующие картины ДБЭ, снимаемые в процессе синтеза, представляют собой набор эквидистантных тяжей, свидетельствующих об эпитаксиальном росте гладкой пленки. Этот вывод подтверждается спектрами рентгеновской дифрактометрии, содержащими пики только от одной системы плоскостей EuO. Наблюдаемые вокруг пиков толщинные осцилляции указывают на атомную резкость границ раздела.

Магнитные свойства сформированных таким образом структур демонстрируют характерную для EuO температуру ферромагнитного перехода  $T_C \approx 69$  К и момент насыщения  $7 \mu_B/\text{Eu}$ . Транспортные измерения показывают, что EuO - изолятор, свидетельствуя о стехиометричности пленок. В совокупности, результаты исследований указывают на перспективность разработанной методики синтеза.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт», РФ (20-79-10028, 22-13-00004, 24-19-00038) и Министерства науки и высшего образования России (075-15-2021-1351). Работа Д.В. Аверьянова поддержана стипендией Президента РФ (СП-3111.2022.5).

#### Литература

1. D. V. Averyanov et al., ACS Appl. Mater. Interfaces **7**, 6146 (2015).
2. D. V. Averyanov et al., J. Magn. Magn. Mat. **459**, 136 (2018).
3. D. V. Averyanov et al., Adv. Funct. Mater. **31**, 2104925 (2021).
4. D. V. Averyanov et al., J. Mater. Chem. C **11**, 5481 (2023).

**ИНЖИНИРИНГ СЛОИСТОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА GdAlSi  
ПУТЕМ ГРАФИТИЗАЦИИ**

*\*Д.В. Аверьянов<sup>1</sup>, И.С. Соколов<sup>1</sup>, А.Н. Талденков<sup>1</sup>, О.Е. Парфёнов<sup>1</sup>, К.В. Ларионов<sup>2</sup>,  
П.Б. Сорокин<sup>2</sup>, О.А. Кондратьев<sup>1</sup>, А.М. Токмачёв<sup>1</sup>, В.Г. Сторчак<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт»

Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1, e-mail: [dm\\_averyanov@mail.ru](mailto:dm_averyanov@mail.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет МИСИС

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, дом 4

**ENGINEERING OF THE LAYERED FERROMAGNET GdAlSi VIA GRAPHITIZATION**

*\*D.V. Averyanov<sup>1</sup>, I.S. Sokolov<sup>1</sup>, A.N. Taldenkov<sup>1</sup>, O.E. Parfenov<sup>1</sup>, K.V. Larionov<sup>2</sup>, P.B. Sorokin<sup>2</sup>,  
O.A. Kondratev<sup>1</sup>, A.M. Tokmachev<sup>1</sup>, V.G. Storzhak<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute»

Russia, 123182, Moscow, Kurchatov Sq. 1, e-mail: [dm\\_averyanov@mail.ru](mailto:dm_averyanov@mail.ru)

<sup>2</sup>National University of Science and Technology MISIS

Russia, 119049, Moscow, Leninskiy prospekt 4

Layered magnetic materials establish an important class of compounds renowned for their unconventional physical properties [1, 2] and strongly related to 2D magnets [3–5]. This class is rather narrow, motivating the search for new representatives and the development of synthetic techniques. Here, employing GdAlSi films we study graphitization as an approach to produce new layered magnets.

GdAlSi films were synthesized by depositing Gd and Al on the Si(111) substrate in an MBE system. It was found that GdAlSi films, tetragonal in the bulk, transform to a new trigonal layered polymorph when synthesized in the form of thin films on Si(111). Notably, the new layered phase of GdAlSi demonstrates ferromagnetic ordering, in contrast to the non-layered, tetragonal polymorph. This finding is supported by electron transport measurements manifesting the anomalous Hall effect and negative magnetoresistance. Overall, the results show that graphitization is a powerful instrument to design new functional layered materials.

Слоистые магнитные материалы образуют класс соединений, примечательный как необычными физическими свойствами [1, 2], так и родством с двумерными магнитами [3–5]. Количество соединений, входящих в этот класс, невелико, что мотивирует поиск его новых представителей и развитие методик их синтеза. В данной работе исследуется возможность формирования слоистых магнитных соединений с помощью явления, называемого графитизацией, то есть стабилизации слоистой графитоподобной структуры

материала при приближении к двумерному пределу. Этот эффект наблюдается в кубических соединениях; в данной же работе он исследуется в материале с тетрагональной кристаллической структурой – GdAlSi.

Эпитаксиальные пленки GdAlSi синтезировались методом МЛЭ путем осаждения атомов Gd и Al на нагретую подложку Si. При этом атомы Si, необходимые для роста, поступали за счет диффузионных процессов из подложки. Совокупный анализ структурных свойств образцов с помощью дифракции быстрых электронов и рентгеновской дифрактометрии позволяет заключить, что при синтезе на Si(001) формируется GdAlSi с тетрагональной кристаллической решеткой. Эта полиморфная модификация стабильна и для макроскопических образцов. Однако при выращивании сверхтонких пленок на Si(111) наблюдается формирование иной, тригональной, кристаллической решетки со слоистой структурой, также переходящей в тетрагональную при превышении критической толщины (около 20 монослоев). Возможность наблюдаемой трансформации подтверждается теоретическими расчетами и объясняется увеличением вклада поверхностной энергии с уменьшением толщины.

Магнитные свойства новой полученной фазы GdAlSi исследовались с помощью СКВИД-магнитометрии. Было обнаружено, что GdAlSi со слоистой структурой проявляет ферромагнитное упорядочение (в отличие от тетрагонального полиморфа), обусловленное  $4f$ -оболочками атомов Gd. Магнитный момент резко возрастает при охлаждении ниже температуры  $T_C \approx 35 \div 40$  К, полевые зависимости имеют выраженный гистерезис. Ферромагнетизм подтверждается транспортными измерениями, демонстрирующими аномальный эффект Холла и отрицательное магнитосопротивление.

В целом, результаты работы показывают, что графитизация может быть мощным инструментом формирования функциональных слоистых материалов.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт», РФ (20-79-10028, 22-13-00004, 24-19-00038) и Министерства науки и высшего образования России (075-15-2021-1351). Работа Д.В. Аверьянова поддержана стипендией Президента РФ (СП-3111.2022.5).

#### Литература

1. H. Kurebayashi et al., Nat. Rev. Phys. **4**, 150 (2022).
2. O.E. Parfenov et al., Mater. Today **29**, 20 (2019).
3. B. Huang et al., Nature **546**, 270 (2017).
4. C. Gong et al., Nature **546**, 265 (2017).
5. A.M. Tokmachev et al., Nat. Commun. **9**, 1672 (2018).

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РОСТА И ПОТОКА МЫШЬЯКА НА СТРУКТУРУ  
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК InAs НА ПОДЛОЖКАХ САПФИРА**

**\**A.N. Klochkov<sup>1</sup>, A.N. Vinichenko<sup>1</sup>, I.S. Vasil'evskii<sup>1</sup>, S.M. Ryndya<sup>1</sup>, Ya.S. Tretyakov<sup>1</sup>,  
N.I. Kargin<sup>1</sup>***

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: [klochkov\\_alexey@mail.ru](mailto:klochkov_alexey@mail.ru)

**INFLUENCE OF GROWTH TEMPERATURE AND ARSENIC FLOW  
ON THE STRUCTURE OF EPITAXIAL InAs FILMS ON SAPPHIRE SUBSTRATES**

***A.N. Klochkov<sup>1</sup>, A.N. Vinichenko<sup>1</sup>, I.S. Vasil'evskii<sup>1</sup>, S.M. Ryndya<sup>1</sup>, Ya.S. Tretyakov<sup>1</sup>,  
N.I. Kargin<sup>1</sup>***

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI  
Russia, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, 115409, e-mail: [klochkov\\_alexey@mail.ru](mailto:klochkov_alexey@mail.ru)

InAs films were obtained by molecular beam epitaxy on sapphire substrates. The effect of InAs growth rate, substrate temperature, arsenic flux and doping concentration on the film crystal structure, surface morphology, concentration and mobility is investigated.

В данной работе исследуются технологические процессы гетероэпитаксиального получения полупроводниковых пленок InAs на широкозонных подложках сапфира Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [1]. Прикладными преимуществами такой системы является высокая теплопроводность подложки, повышенная стойкость к воздействию ионизирующего излучения, низкий температурный коэффициент сопротивления, что благоприятно для создания датчиков магнитного поля на эффекте Холла. Эпитаксиальный рост является сложной задачей из-за различной кристаллической структуры и различающихся периодов кристаллических решеток подложки и пленки InAs.

Пленки InAs получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в установке Riber Compact 21-T. Подложкой являлись epi-ready пластины α-сапфира, поверхность которых была параллельна с-плоскости (направление [0001]). В качестве буферного затравочного слоя использовались AlGaAs или InAlAs [1]. После буферного слоя выращивались пленки InAs толщиной от 30 нм до 300 нм с различными: скоростью роста v<sub>G</sub>, температурой подложки T<sub>G</sub>, потоком мышьяка P<sub>As</sub> и концентрацией легирования. Индивидуальные особенности образцов приведены в табл. 1.

Исследования методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии показали, что все полученные пленки InAs имеют кристаллографическую ориентацию (111). Пленки являются текстурированными поликри-



сталлами, сформированными двумя группами зерен-двойников, отличающихся поворотом на  $60^\circ$  относительно нормали. Развита методика оценки степени двойникования, размеров зерен для данных эпитаксиальных слоев: полюсные фигуры, фи-сканы, построение Вильямсона-Холла. Размер и плотность островков анализируются при помощи обработки данных атомно-силовой микроскопии.

Среднеквадратичная шероховатость поверхности пленок  $R_q$ , подвижность  $\mu$  и концентрация  $n_s$  носителей заряда (см. табл. 1) существенно зависят от условий получения слоев InAs. В серии образцов 771–773 варьировался поток мышьяка. В образце 771 с недостатком мышьяка наблюдается р-тип проводимости и характерная бугристая поверхность, а при повышении  $P_{As}$  проводимость меняется на электронный тип и снижается шероховатость. Увеличение толщины пленки (обр. 774–776) улучшает подвижность электронов, но при этом возрастает шероховатость поверхности за счет объединения отдельных холмов в вытянутые хребты.

Таблица 1

**Зависимость подвижности  $\mu$  и концентрации  $n_s$  носителей заряда, а также шероховатости  $R_q$  поверхности пленок InAs от индивидуальных особенностей конструкции и режимов получения образцов**

Обр.	L(InAs), нм	$v_G$ , Å/мин	$T_G$ , °C	$P_{As}$ , $10^{-5}$ Торр	$n_s$ , $10^{12}$ см $^{-2}$	$\mu$ , см $^2$ /В·с	$R_q$ , нм
708	100	40	460	–	12	1040	23.0
709	100	40	490	–	106	780	20.3
710	100	40	600	–	102	700	27.5
771	30	20	480	0.8	$5.3 \cdot 10^6$	2	49.1
772	30	20	480	3.1	57	390	14.1
773	30	20	480	9.4	83	90	30.2
774	75	40	480	6.8	45	820	20.4
775	150	40	480	5.9	74	1020	23.2
776	300	40	480	6.2	156	1170	39.4
777	150	40	450	3.2	96	575	20.4
778	150	40	420	5.9	224	365	16.7
779	150	40	450	6.5	571	275	17.6
780	150	40	450	10.1	247	450	20.3
781	150	40	450	5.2	310	840	19.7

#### Литература

1. A. Klochkov, A. Vinichenko, A. Samolyga, S. Ryndya, M. Poliakov, N. Kargin, I. Vasil'evskii, Applied Surface Science. 619 (2023) 156722. DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.156722.

**ВТОРИЧНО-ИОННАЯ МАСС СПЕКТРОМЕТРИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА  
МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ InGaAlAs**

*\*Д.Д. Николаев, А.Н. Клочков, А.Н. Виниченко, И.С. Васильевский, Н.И. Каргин*

<sup>1</sup>Национальный ядерный исследовательский университет «МИФИ»  
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31, e-mail: [qwirnersco@gmail.com](mailto:qwirnersco@gmail.com)

**USAGE OF SIMS FOR MULTILAYER InGaAlAs HETEROSTRUCTURE ANALYSIS**

*\*D.D. Nikolaev, A.N. Klochkov, A.N. Vinichenko, I.S. Vasilevskii, N.I. Kargin*

<sup>1</sup>National research nuclear university «MEPhI»  
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe r., 31, e-mail: [qwirnersco@gmail.com](mailto:qwirnersco@gmail.com)

Secondary ion mass-spectrometry (SIMS) – is an important technique, which can give information on thickness and material composition of semiconductor layers. Main difficulty in its usage is sputtering yields strong dependence on layer composition (matrix effect). Today main way of dealing with such problems is calculating relative sensitivity coefficients by studying samples with already known parameters. But, some studies [1, 3, 4] say, that this effect can be mitigated by usage of CsM<sup>+</sup> ions (where M is studied material) instead of just M<sup>+</sup> ions. We will speak about this method performed on ToF-SIMS V machine, with 1–2 keV Cs<sup>+</sup> ions, and AlGaAs and InAlGaAs as samples.

Масс-спектроскопия вторичных ионов (ВИМС) — хорошо зарекомендовавший себя метод исследования структуры полупроводников, способный предоставить информацию не только о составе, но и о толщине слоёв. Главной трудностью в его применении является сильная зависимость скорости распыления и «наблюдаемого» состава слоя от действительного его состава (матричный эффект).

На данный момент существует множество исследований по теме, использующих экспериментальные калибрующие коэффициенты, на которые требуется умножить «наблюдаемую» интенсивность сигнала для получения действительной. Методы получения такого рода коэффициентов заключаются в независимой оценке концентрации исследуемого вещества, чтобы, затем, построить калибровочный график зависимости интенсивности сигнала от концентрации. Однако для исследуемого пучка Cs<sup>+</sup> в гетероструктурах наблюдается эффект достаточно высокой согласованности концентрации кластеров CsM<sup>+</sup> с реальным составом гетероструктуры.

Будут рассматриваться особенности применения ВИМС, границы применимости метода с использованием кластеров CsM<sup>+</sup>, оценки скоростей распыления гетероструктур в зависимости от состава. Для случаев, при ко-

торых использование CsM<sup>+</sup> не позволяет справиться с матричным эффектом, будут построены калибровочные графики. В данной работе используется установка ToF-SIMS V и ионы Cs<sup>+</sup> с энергиями 1–2 кэВ, для независимой оценки стандартов используется фотолюминесценция (PL) и рентгеновская дифракция (XRD).

Полученные результаты по стандартам состава AlGaAs представлены в табл. 1. Как можно видеть, сигналы для CsM<sup>+</sup> хорошо согласуются с результатами фотолюминесценции, что свидетельствует о подавлении матричного эффекта, однако для образца 3 эффект подавлен не полностью, поэтому требуется построить калибровочные графики.

Таблица 1

Информация по исследованным образцам

Метод	х в образце 1, Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	х в образце 2, Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	х в образце 3, In <sub>x</sub> Al <sub>y</sub> Ga <sub>1-x-y</sub> As	у в образце 3, In <sub>x</sub> Al <sub>y</sub> Ga <sub>1-x-y</sub> As
PL	0,31	0,18	—	—
XRD	—	—	0,52	0,12
M <sup>+</sup>	0,41	0,24	0,8	0,07
CsM <sup>+</sup>	0,32	0,19	0,67	0,08

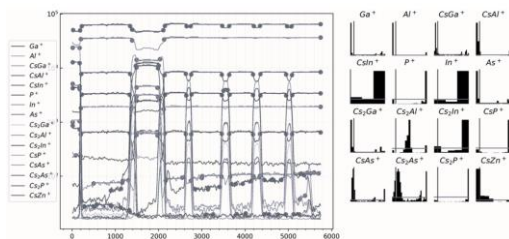


Рис. 1. Результат работы программы по обнаружению плато, точками обозначены их границы.

Справа находятся гистограммы для каждого сигнала

для сигналов элементов. На рис. 1 представлен результат работы программы. Кроме графического представления, программа печатает таблицу, совместимую с табличными редакторами, пригодную для дальнейшей обработки.

#### Литература

1. Chakraborty, P., 2024. Int. J. Mod. Phys. B 2450440. 10.1142/S021797922450440X.
2. Gerardi, C., Giannini, C., Passaseo, A., Tapfer, L., 1997. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena 15, 2037–2045. 10.1116/1.589220.
3. Wittmaack, K., 2013. Surface Science Reports 68, 108–230. 10.1016/j.surfrep.2012.11.001.
4. Wittmaack, K., 2012. Surface Science 606, L18–L21. 10.1016/j.susc.2011.10.021.

**ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ InSb ДИАМЕТРОМ ДО 100 мм  
И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИРОВАННЫХ ПЛАСТИН НА ИХ ОСНОВЕ**

**\*Р.Ю. Козлов<sup>1,2</sup>, А.А. Трофимов<sup>3</sup>, Е.В. Молодцова<sup>2</sup>, П.В. Павлов<sup>2</sup>, О.С. Павлова<sup>2</sup>,  
М.С. Нестуркин<sup>1,2</sup>, Н.В. Щеников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АО «Гиредмет» Россия г. Москва, ул. Электродная, дом 2, с1  
e-mail: [RYKozlov@rosatom.ru](mailto:RYKozlov@rosatom.ru)

<sup>2</sup>НИТУ «МИСИС» Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1

<sup>3</sup>ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» Россия, 111538, г. Москва, ул. Косинская, д.9

**GROWTH OF InSb SINGLE CRYSTALS WITH DIAMETERS UP TO 100 mm  
AND PRODUCING POLISHED WAFERS**

**\*R.Y. Kozlov<sup>1,2</sup>, A.A. Trofimov<sup>3</sup>, E.V. Molodtsova<sup>2</sup>, P.V. Pavlov<sup>2</sup>, O.S. Pavlova<sup>2</sup>,  
M.S. Nesturkin<sup>1,2</sup>, N.V. Schenikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>JSC «Giredmet» Russia, 111524, Moscow st. Elektrodnaya, 2/1  
e-mail: [RYKozlov@rosatom.ru](mailto:RYKozlov@rosatom.ru)

<sup>2</sup>NRTU «MISIS» Russia, 119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 1.4/1

<sup>3</sup>NPO Orion, Russia, 111538, Moscow, st. Kosinskaya, 9

InSb (indium antimonide) is a semiconductor material that has unique properties such as high electron mobility and high sensitivity to infrared radiation. In the present work the peculiarities of growth of single crystals of indium antimonide and obtaining polished wafers based on them are discussed

InSb (антимонид индия) – это полупроводниковый материал, который обладает уникальными свойствами, такими как высокая подвижность электронов и большая чувствительность к инфракрасному излучению. В настоящей работе рассматриваются особенности роста монокристаллов антимонида индия и получения полированных пластин на их основе.

Антимонид индия (InSb) занимает особое место в группе полупроводниковых соединений АЗВ5, отличаясь уникальными свойствами: самой низкой температурой плавления, малой шириной запрещенной зоны, высокой подвижностью носителей заряда, совершенством кристаллической структуры. Благодаря этим свойствам антимонид индия широко используется в качестве элементной базы для создания фотоэлектронных устройств и приемников ИК-излучения, работающих в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Матрицы на основе InSb отличаются высокой однородностью свойств по площади, большим количеством работоспособных элементов, более низкой ценой в сравнении с аналогичными устройствами на основе КРТ. Все это делает InSb лидирующим материалом для крупноформатных матриц на средневолновый ИК-диапазон [1].

МФПУ на подложках из антимионда индия являются основным структурным элементом высокочувствительных, дальнедействующих тепловизионных систем. В основе принципа работы таких систем лежит преобразование теплового излучения объекта в его видимое изображение. Благодаря собственному тепловому излучению, замаскированные или скрытые объекты становятся видимыми. В последние годы значительно расширились области использования тепловизионной техники, которая все активнее проникает в различные сферы народнохозяйственной деятельности [2].

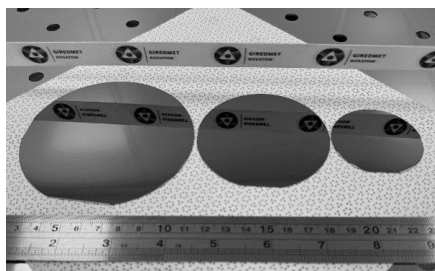


Рис. 1. Полированные пластины InSb диаметром 100 мм, 76,2 мм и 50,8 мм

В течение последних 30 лет АО «Гиредмет» является единственной организацией в России и ближнем зарубежье, где ведутся новые технологические разработки не только по выращиванию монокристаллов антимионда индия различного диаметра [3–5], но и по созданию промышленно-ориентированной технологии получения полированных

пластин InSb диаметром до 100 мм с параметрами, соответствующими мировому уровню. [6].

### Литература

1. Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Мирофянченко А.Е., Власов П.В., Лопухин А.А., Пряникова Е.В., Соловьев В.А., Семенов А.Н., Мельцер Б.Я., Комиссарова Т., Львова Т.В., Иванов С.В. Исследование структур InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Успехи прикладной физики. 2015; 3(6): 559–565.
2. Р.Ю. Козлов, С.С. Кормилицина, Е.В. Молодцова, Е.О. Журавлев. Выращивание монокристаллов антимионда индия диаметром 100 мм модифицированным методом Чохральского // Известия вузов. Материалы электронной техники, 2021, Т. 24, № 3, 190–198.
3. Патент РФ №2482228 от 20.05.2013, Бюл. №14.
4. Комаровский Н.Ю., Молодцова Е.В., Белов А.Г., Гришечкин М.Б., Козлов Р.Ю., и др. Исследование монокристаллов антимионда индия, полученных модернизированным методом Чохральского в различных кристаллографических направлениях. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023;89(8): 38–46.
5. Абрамова Е. Н., Козлов Р. Ю., Сыров Ю. В., Хохлов А. И., Пархоменко Ю. Н. Современные научные и практические решения в технологии изготовления подложек полупроводниковых соединений АЗВ5. Обзор // Конденсированные среды и межфазные границы, 2024, № 26 (1), с. 3–24.
6. Wafer Technology Ltd. URL: <http://www.wafertech.co.uk/>.

**ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ Ag/TiO<sub>2</sub>/Ti**

*М.А. Евсейчик<sup>1</sup>, \*Л.С. Хорощко<sup>1,2</sup>, А.В. Баглов<sup>1,2</sup>, Ш.И. Маматкулов<sup>3</sup>,  
М.Д. Печерская<sup>3</sup>, Д.В. Якимчук<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
Беларусь, 220030, г. Минск, пр-т Независимости, дом 4, e-mail: [L.s.khoroshko@yandex.by](mailto:L.s.khoroshko@yandex.by)

<sup>3</sup>Институт материаловедения НПО «Физика-Солнце» АНРУз  
Узбекистан, 100084, г. Ташкент, ул. Чингиза Айтматова 2Б

<sup>4</sup>ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»  
Беларусь, 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 19

**PHOTOCATALYTICALLY ACTIVE NANOHETEROSTRUCTURES Ag/TiO<sub>2</sub>/Ti**

*М.А. Yauseichyk<sup>1</sup>, \*L.S. Khoroshko<sup>1,2</sup>, A.V. Baglov<sup>1,2</sup>, S.I. Mamatkulov<sup>3</sup>,  
M.D. Pecherskaya<sup>3</sup>, D.V. Yakimchuk<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Belarus, 220013 Minsk, 6 P. Browka str.

<sup>2</sup>Belarusian State University  
Belarus, 220030 Minsk, 4 Nezavisimosti Av., e-mail: [L.s.khoroshko@yandex.by](mailto:L.s.khoroshko@yandex.by)

<sup>3</sup>Institute of Materials Science, Uzbekistan Academy of Sciences  
Uzbekistan, 100084, Tashkent, 2B Chingiz Aytmатов str.

<sup>4</sup>Scientific-Practical Materials Research Center of NAS of Belarus  
Belarus, 220072 Minsk, 19 P. Browka str.

In this work we have studied the photocatalytic activity of nanoheterostructures Ag/TiO<sub>2</sub>/Ti obtained by electrochemical deposition of silver from a solution of silver nitrate (AgNO<sub>3</sub>) on TiO<sub>2</sub>/Ti substrate. The study of the surface morphology by scanning electron microscopy shows the formation of a structure in the form of dendrites on the initial substrates. The determined photocatalytic efficiency of the nanoheterostructures in point of the model dye in water solution (Rhodamine B, 10 mg/L) is about 20 % under UV excitation (365 nm). The investigated nanoheterostructures Ag/TiO<sub>2</sub>/Ti have a prospect to obtain multifunctional coatings combining photocatalytic activity and SERS.

Диоксид титана (TiO<sub>2</sub>) является широко используемым фотокатализатором, но главным его недостатком является слабая чувствительность к излучению видимого диапазона [1]. Одной из возможных мер повышения фотокаталитической эффективности TiO<sub>2</sub> под воздействием солнечного света является модификация его поверхности наноструктурами благородных металлов [2, 3]. В данной работе мы изучили морфологию и фотокаталитическую активность поверхности наногетероструктур Ag/TiO<sub>2</sub>/Ti.

Серебро электрохимически осаждали на подложки  $\text{TiO}_2/\text{Ti}$ , полученные по методике, описанной в [4], из водного раствора нитрата серебра ( $\text{AgNO}_3$ , 10 ммоль/мл) в потенциостатическом режиме при напряжении 1 В. Морфологию поверхности исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа, фотокаталитическую активность определяли по изменению концентрации модельного красителя в тестовом растворе по методике, описанной в [5].

На поверхности подложки  $\text{TiO}_2/\text{Ti}$  образуются неравномерно распределенные структуры серебра в виде дендритов размерами до 10 мкм, (рис. 1а), также наблюдаются агломераты частиц серебра. Эффективность фотокаталитической деструкции красителя Родамина Б в водном растворе в присутствии структур  $\text{Ag}/\text{TiO}_2/\text{Ti}$  при экспонировании УФ-излучением (365 нм) в течение 60 мин составляет до 20 % (рис. 1б).

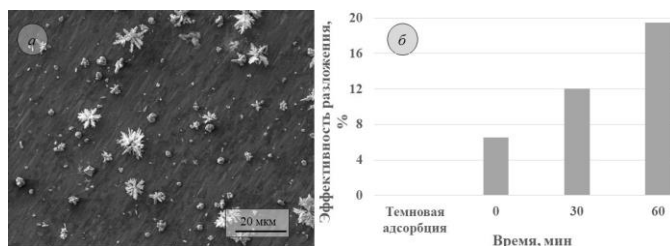


Рис. 1. Микрофотография поверхности наногетероструктуры  $\text{Ag}/\text{TiO}_2/\text{Ti}$  (а); эффективность разложения Родамина Б при УФ-экспонировании (365 нм) (б)

Таким образом, наногетероструктуры  $\text{Ag}/\text{TiO}_2/\text{Ti}$  перспективны как для создания иммобилизованных фотокатализаторов для систем очистки воды и воздуха, так и для возможной разработки на их основе мультифункциональных покрытий, применяемых в том числе, в приложениях плазмоники.

Исследования поддержаны БРФФИ-МИРРУ (договор № Ф23УЗБ-061).

### Литература

1. A. Fujishima et al., J. Surf. Sci. Rep., **63**, 515 (2008).
2. I. Wysocka et al., J. Nanomater., **9** (8), 1129 (2019).
3. E. V. Salomatina et al., J. Environ. Chem. Eng., **5**, 9, (2021).
4. М.А. Евсейчик и др. Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. X Международ. науч. конф., 12–14 окт. 2022 г.: – Минск: БГУ, 2022. – С. 380.
5. М.А. Евсейчик и др. Журнал БГУ. Физика **2**, 58 (2023).

## ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ РУТИЛА

*\*А.В. Баглов<sup>1,2</sup>, Л.С. Хорошко<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6  
<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
Беларусь, 220030, г. Минск, пр-т Независимости, дом 4, e-mail: [baglov@bsu.by](mailto:baglov@bsu.by)

## ELECTRONIC STRUCTURE OF RUTILE SURFACE

*\*A.V. Baglov<sup>1,2</sup>, L.S. Khoroshko<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Belarus, 220013 Minsk, 6 P. Browka str.  
<sup>2</sup>Belarusian State University  
Belarus, 220030 Minsk, 4 Nezavisimosti Av., e-mail: [baglov@bsu.by](mailto:baglov@bsu.by)

In this work we have studied the electronic structure of the rutile (001) surface before and after structure relaxation by the *ab-initio* methods using the density of states theory and pseudopotential. It was established that the higher valence states and lower conduction states exhibit a twofold degeneracy of the zones along the M-K direction, disregarding relaxation. However, relaxation of the surface removes the degeneracy without significantly altering the dispersion laws in the energy region under investigation. Therefore, it is necessary to consider the structural relaxation of the surface in order to obtain an accurate representation of the energy band dispersion.

Диоксид титана (TiO<sub>2</sub>) является традиционно используемым материалом для изготовления фотокатализаторов, активируемых УФ-излучением, основным его недостатком является слабая чувствительность к излучению видимого диапазона [1]. Одним из подходов по исправлению этого недостатка является формирование наночастиц с поверхностью заданной кристаллографической ориентации. Непосредственно перед синтезом предпочтительно исследовать электронную структуру той или иной поверхности. При этом, следует учитывать эффекты реконструкции и релаксации поверхности, т.к. пренебрежение ими может привести к некорректной оценке свойств. В данной работе мы продемонстрируем влияние учета эффекта релаксации поверхности диоксида титана (фаза – рутил) в рамках численного квантово-механического моделирования из первых принципов.

Поверхность ориентации (001) строили из предварительно отрелаксированной структуры рутила. Модель включала четыре слоя рутила, три из которых призваны обеспечивать эффект объемной фазы материала, а последний непосредственно для учета релаксации. Вычисления проводили в



рамках теории функционала плотности и псевдопотенциала, реализованных в пакете *OpenMX* [2, 3].

В процессе релаксации длины связей Ti–O в поверхностном слое уменьшаются, что приводит к искажению структуры, в результате которого атомы кислорода оказываются выше (в проекции на ось  $c$ ) атомов титана. На рис. 1 приведена зонная структура поверхности рутила (001) до и после релаксации. Без учета релаксации наблюдается двукратное вырождение зон вдоль направления  $M$ – $K$  для высших валентных состояний и низших состояний проводимости. Релаксация поверхности приводит к снятию вырождения без значительного изменения законов дисперсии в исследуемой области энергий.

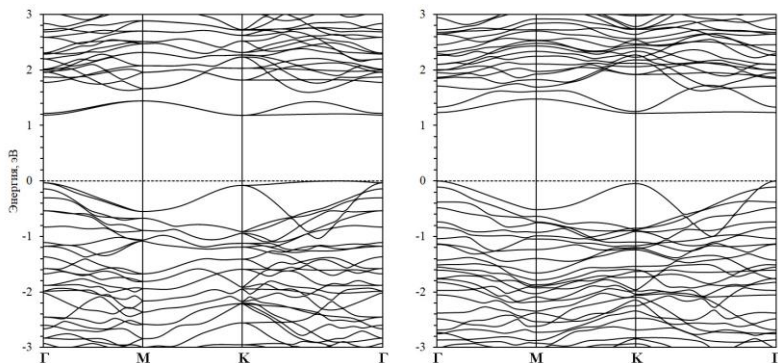


Рис. 1. Зонная структура поверхности (001) рутила без релаксации (слева) и после нее (справа). За ноль принят потолок валентной зоны

Таким образом, проведение и учет структурной релаксации поверхности необходимы не только с целью изучения особенностей этого процесса, но и для получения корректной картины дисперсии энергетических зон, что важно для интерпретации экспериментальных данных, в частности, спектроскопических исследований.

Работа поддержана БРФФИ (договор № T23УЗБ-111).

#### Литература

1. A. Fujishima et al., *J. Surf. Sci. Rep.*, **63**, 515 (2008).
2. T. Ozaki, *Phys. Rev. B* **67**, 155108 (2003).
3. T. Ozaki, *Phys. Rev. B* **69**, 195113 (2004).

**ЗОННАЯ СТРУКТУРА ПЕРОВСКИТНОГО ОРТОФЕРРИТА ИТТРИЯ  
С ХАББАРДОВСКИМ ФУНКЦИОНАЛОМ**

*Д.И. Дыдышко<sup>1</sup>, \*А.В. Баглов<sup>1,2</sup>, Л.С. Хорошко<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
Беларусь, 220030, г. Минск, пр-т Независимости, дом 4, e-mail: [baglov@bsu.by](mailto:baglov@bsu.by)  
<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6

**BAND STRUCTURE OF PEROVSKITE YTTRIUM ORTHOFERRITE  
WITH HUBBARD FUNCTIONAL**

*D.I. Dydyszko<sup>1</sup>, \*A.V. Baglov<sup>1,2</sup>, L.S. Khoroshko<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University  
Belarus, 220030 Minsk, 4 Nezavisimosti Av., e-mail: [baglov@bsu.by](mailto:baglov@bsu.by)  
<sup>2</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Belarus, 220013 Minsk, 6 P. Browka str.

In this work, we investigated the zone structure of yttrium orthoferrite  $\text{YFeO}_3$  with perovskite structure and different types of antiferromagnetic ordering using first-principles methods. Under standard conditions perovskite  $\text{YFeO}_3$  is antiferromagnetic. In the perovskite structure, iron ions can form four magnetic configurations: one ferromagnetic and three antiferromagnetic (*AFM*), which are called *A-AFM*, *C-AFM*, and *G-AFM*, the last is the most energy efficient. The results indicate that the width of the energy gap is maximal for the *G-AFM* phase, and the bands of *3d*-states are maximally localized compared to others.

Мультиферроики представляют собой материалы, сочетающие магнитное и электрическое упорядочение. Последние годы исследования наноструктурированных мультиферроиков мотивированы возможностью создания новых энергоэффективных устройств обработки информации, объединяемых термином стрейнотроника – направление в физике конденсированного состояния, использующего методы деформационной инженерии и физические эффекты, порождаемые этими деформациями, для реализации нового поколения устройств информационных, сенсорных и энергосберегающих технологий [1]. В данной работе исследована дисперсия электронных зон мультиферроика  $\text{YFeO}_3$  со структурой перовскита в различных антиферромагнитных конфигурациях методами из первых принципов.

Экспериментально установлено, что в стандартных условиях перовскит  $\text{YFeO}_3$  является антиферромагнетиком [2]. Однако в структуре перовскита ионы железа могут образовать четыре магнитных конфигурации: одна ферромагнитная и три антиферромагнитных (*AFM*), называемых *A-AFM*, *C-*

*AFM* и *G-AFM*. Так как все они являются более энергетически более выгодными, чем ферромагнитная, то электронную структуру последней не анализировали [3]. Вычисления проводили в рамках теории функционала плотности и псевдопотенциала, реализованных в пакете *OpenMX*. Для более точного учета кулоновской корреляции *3d*-электронов железа использовали поправку Хаббарда к приближению локальной плотности – т.н. называемый хаббардовский функционал. Величина поправки составляла 5,8 эВ.

Зонная структура всех *AFM* вариантов приведена на рис. 1. Ширина запрещенной зоны составляет 5,5–5,8 эВ и максимальна для *G-AFM*. Внутри запрещенной зоны выделяется две полосы, связанных с *3d*-состояниями ионов железа, лежащих на 2,0–2,8 эВ выше потолка валентной зоны. Увеличение этой энергии связано в первую очередь с локализацией *3d*-состояний. Форма дна зоны проводимости остается практически неизменной, в то время как для *G-AFM* наблюдается сжатие (уменьшение амплитуды) энергетических зон.

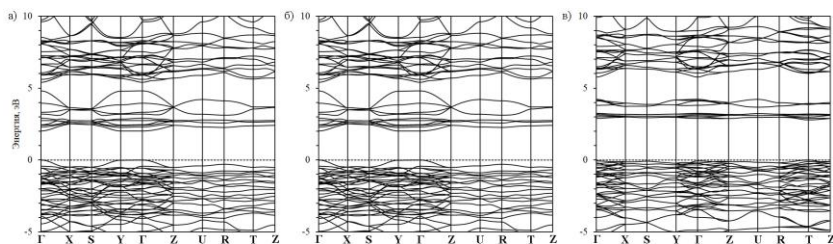


Рис. 1. Зонная структура поверхности перовскитного ортоферрита иттрия в различных антиферромагнитных упорядочениях: а) *A-AFM*; б) *C-AFM*; в) *G-AFM*.

За ноль принят потолок валентной зоны

Исследована зонная структура ортоферрита иттрия со структурой перовскита с различными типами антиферромагнитного упорядочения методами из первых принципов. Показано, что для *G-AFM* фазы, ширина запрещенной зоны максимальна, а полосы *3d*-состояний максимально локализованы относительно других типов.

### Литература

1. А.А. Бухараев и др., УФН, **188**, 1288 (2018).
2. Boulay du D. et al., Acta Cryst. **51**, 921 (1995).
3. Хорошко Л.С., Баглов А.В. Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы шестой Междунар. науч.-практ. конф. 20–21 мая 2021 г., НИУ «Институт ПФП им. А.Н. Севченко БГУ», Минск: 2021. – с. 251–253.

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ДИИОДИДА ЭТИЛЕНДИАММОНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ И СВЕТОПОГЛОЩЕНИЕ МЕТАЛЛОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ

*\*В.С. Будник<sup>1</sup>, А.К. Тучковский<sup>1</sup>, В.В. Филиппов<sup>1</sup>, В.А. Лабунюв<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail [valeria.budnik@mail.ru](mailto:valeria.budnik@mail.ru)

## THE EFFECT OF ETHYLENEDIAMMONIUM DIODIDE ADDITIVE ON THE MORPHOLOGY AND LIGHT ABSORPTION OF ORGANOMETALLIC PEROVSKITES

*\*V.S. Budnik<sup>1</sup>, A.K. Tuchkovsky<sup>1</sup>, V.V. Filippov<sup>1</sup>, V.A. Labunov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Belarus, 220013 Minsk  
P. Browka 6, e-mail: [valeria.budnik@mail.ru](mailto:valeria.budnik@mail.ru)

We studied iodine perovskites before and after modification with the addition of ethylenediamine, which was introduced into the structure in the form of a diiodideammonium salt. The size, shape of crystallites and optical absorbance were analyzed. Data were obtained on the influence of the carbon skeleton with two amino groups on the above properties of perovskites. The influence of the substitution reaction between the initial perovskite and the added addition of diiodideammonium salt on the structure and light absorption of the resulting films has been demonstrated.

Солнечные элементы на основе металлорганических перовскитов широко исследуются благодаря их высокой эффективности и простоте изготовления. Контролируемая кристаллизация имеет практическое значение для получения высококачественных тонких плёнок перовскита с уменьшенным количеством структурных дефектов. Амины могут сильно координироваться с ионами свинца и широко используются для управления ростом кристаллитов перовскита [1].

В настоящей работе изучалось внедрение добавки этилендиамина в виде четвертичной диаммониевой соли. Исследовались морфологические и оптические свойства в зависимости от концентрации соединения. Плёнки толщиной 0,8–1,0 мкм были получены blade-coating методом, затем отжигались при  $T = 100$  °C в течение 5 минут. Растворы прекурсора перовскита получали смешиванием  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  с  $\text{PbI}_2$  в соотношении 1:1, диiodидиаммониевую соль добавляли в сам прекурсор при перемешивании.

В перовските без добавок, который имеет чёрный цвет, обнаруживаются крупные кристаллиты шестиугольной формы, вогнутые в центре, размерами от 4,0 до 8,0 мкм (средний размер 6,2 мкм) (рис. 1а). При добавлении

соли этилендиамина в концентрации 20 г/л образуются мелкие треугольные кристаллиты размерами 2,0–2,5 мкм, пустоты практически исчезают, а сама плёнка становится красно-оранжевой (рис. 1б).

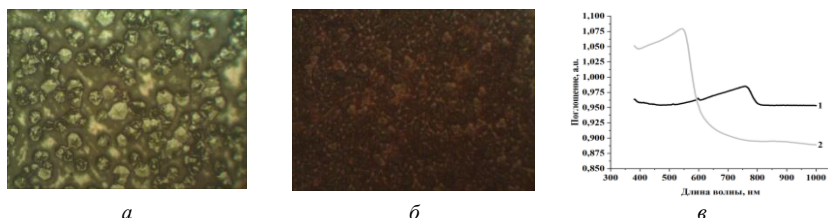


Рис. 1. Внешний вид кристаллитов перовскитов без добавок (а) и с этилендиаммониевой солью (б); спектры поглощения перовскитов без добавок (1) и с включением соли (2)

При изучении светопоглощения вышеуказанных перовскитных образцов наблюдается увеличение поглощения света при добавлении этилендиамина и значительное смещение максимума на кривой поглощения, в сторону меньших длин волн при добавлении диаммониевой соли (от 758 нм (красная область спектра) для плёнок без добавок до 544 нм (зелёная область) при наличии этилендиаммониевой добавки содержанием 20 г/л) (рис. 1б). Для перовскита без добавок снижение поглощения в области за перегибом происходит в районе около 800 нм (инфракрасная область). Применение добавки значительно меняет характер изменения поглощения, приводя к его резкому уменьшению при длинах волн выше 544 нм. Это связано с частичным замещением однозарядного катиона метиламмония на двухзарядный катион этилендиаммония большего размера, что приводит к сужению кристаллической решётки перовскита и смещению максимума поглощения в сторону зелёной области спектра (см. рис. 1в (2)).

Таким образом, были выявлены нюансы морфологии и поглощения света перовскитных плёнок без добавок и с этилендиаммониевой солью. Установлено, что этилендиаммоний дииодид благоприятно влияет на оптические свойства плёнок путём значительного уменьшения размера пустот и упорядочения кристаллитов. Закрепление слоя двух аминогрупп пассивирует дефекты на поверхности перовскита.

#### Литература

1. Xie, J. Modulating MAPbI<sub>3</sub> perovskite solar cells by amide molecules: Crystallographic regulation and surface passivation / J. Xie // Journal of Energy Chemistry. – 2020. – Vol 56. – № 7. – P. 20–26.

**ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ДВУХСЛОЙНОМ  
ТВИСТИРОВАННОМ ГРАФЕНЕ ЛЕГИРОВАННОМ АЗОТОМ**

*\*Н.Г. Ковальчук<sup>1</sup>, С.Л. Прищепа<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail: [n.kovalchuk@bsuir.by](mailto:n.kovalchuk@bsuir.by)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

**MOBILITY OF CHARGE CARRIERS IN BILAYER TWISTED GRAPHENE  
DOPED BY NITROGEN**

*\*N.G. Kovalchuk<sup>1</sup>, S.L. Prischepa<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Belarus, 220013 Minsk, P. Browka 6, e-mail: [n.kovalchuk@bsuir.by](mailto:n.kovalchuk@bsuir.by)

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe highway 31

We present the results of charge carriers' mobility measurements in a bilayer of nitrogen-doped graphene obtained by the chemical vapor deposition method. The structure of graphene was confirmed by Raman scattering data, while X-ray photoluminescence spectroscopy confirmed the nitrogen doping. The Hall bar microstructure used for transport measurements was fabricated by the fs-pulsed laser ablation technique. The value of charge carrier mobility evaluated from concentration ( $n = 5.55 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) and sheet resistance ( $R_{sh} = 5.8 \text{ k}\Omega/\text{sq}$ ) data at  $T = 300 \text{ K}$  is  $\mu = 195 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ .

В данной работе двухслойный твистированный графен был синтезирован методом ХПО при атмосферном давлении из н-декана на медной фольге при температуре 1050 °С. РФЭС-анализ показал, что он содержит концентрацию атомов азота  $n_N \sim 1,5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  [1]. Методом лазерной абляции с использованием фемтосекундного Yb:KGW лазера из образца графена, перенесенного на подложку Si/SiO<sub>2</sub>, была создана микроструктура для проведения измерений эффекта Холла [2].

Проведены измерения сопротивления Холла  $R_H$  в зависимости от магнитного поля  $\mathbf{B}$  в диапазоне температур 50-300 К. Определенная из значений сопротивления Холла концентрация носителей заряда монотонно возрастает с температурой от  $4,95 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при  $T = 2 \text{ K}$  до  $5,55 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при  $T = 300 \text{ K}$  (рис. 1). Полученные данные хорошо согласуются с литературными данными для легированного азотом графена.

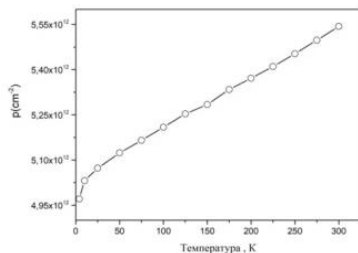


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей заряда (дырок) от температуры

Установлено, что основным типом носителей в легированном азотом графене являются дырки ( $p$ -типа). Среднее число дырок, переносимых азотом ( $p/n_N$ ), составляет 0,37 на атом при комнатной температуре. Это значение очень близко к известному для пиридинового типа N-связи, 0,45 [3].

В свою очередь, поверхностное сопротивление графена монотонно снижается (рис. 2а). Используя соотношения связывающее проводимость, концентрацию зарядов и их подвижность  $\sigma = q \cdot n \cdot \mu$ , где  $q$  – заряд электрона,

получена зависимость подвижности от температуры (рис. 2б).

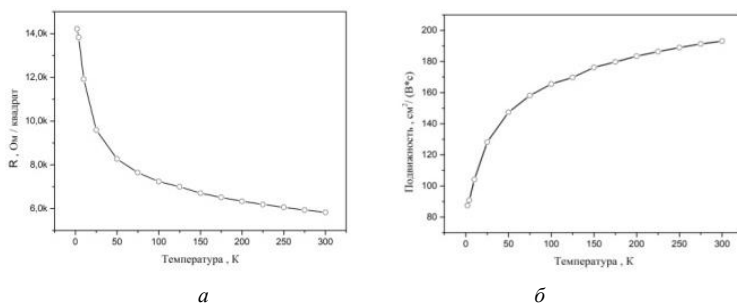


Рис. 2. (а) Зависимость поверхностного сопротивления графена от температуры, (б) зависимость подвижности дырок в графене от температуры

Рост подвижности с температурой указывает, что доминирующим механизмом рассеяния носителей заряда является рассеяние на примесях, что хорошо согласовывается с высокой концентрацией азота в исследуемом графене.

### Литература

1. I.V. Komissarov et all., Beilstein J. of Nanotech., 8, 145-158 (2017).
2. N.G. Kovalchuk et all., Journal of Physics D: Applied Physics, 52 (2019).
3. T. Schiros et all., Nano Lett. 2012, 12, 8, 4025–4031 (2012).

## ВЫСОКАЯ ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ В ДВУМЕРНОЙ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

*\*И.С. Соколов<sup>1</sup>, Д.В. Аверьянов<sup>1</sup>, О.Е. Парфёнов<sup>1</sup>, А.Н. Талденков<sup>1</sup>,  
А.М. Токмачёв<sup>1</sup>, В.Г. Сторчак<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт»  
Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1  
e-mail: [sokolov.ivan.qed@gmail.com](mailto:sokolov.ivan.qed@gmail.com)

## HIGH CARRIER MOBILITY IN 2D GRAPHENE MAGNETIC HETEROSTRUCTURE

*\*I.S. Sokolov<sup>1</sup>, D.V. Averyanov<sup>1</sup>, O.E. Parfenov<sup>1</sup>, A.N. Taldenkov<sup>1</sup>,  
A.M. Tokmachev<sup>1</sup>, V.G. Storchak<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute»  
Kurchatov Sq. 1, 123182 Moscow, Russia, e-mail: [sokolov.ivan.qed@gmail.com](mailto:sokolov.ivan.qed@gmail.com)

Spin polarization of carriers in graphene can be induced by proximity to a magnet [1]. A step forward is to form a heterostructure of graphene with a 2D magnet aiming at new physics of low-dimensional magnetism [2–4]. The high amenability of 2D magnets to external stimuli makes such heterostructures promising for use in energy efficient spintronics. However, preserving graphene’s transport properties in a heterostructure is challenging [4]. Here, we introduce a graphene/gadolinium 2D system that combines spin polarization and high mobility of carriers. This work provides a platform for low-dimensional heterostructures of graphene with 4f-elements integrated with silicon.

Интеграция графена с двумерным магнитным материалом отличается удачным сочетанием высокой подвижности носителей и большой длины спиновой когерентности с возможностью влиять малыми воздействиями на магнитные состояния [2–4]. Однако сильная связь графена с магнитной системой приводит к значительному нарушению его электронной структуры [3, 4]. Таким образом, необходимо решить задачу интеграции графена с двумерным магнитом, достигнув спиновой поляризации носителей заряда в графене с сохранением его транспортных свойств.

В работе представлена двумерная гетероструктура графена с субмонослойной фазой Gd на поверхности кремния, в которой достигнуты оба критически важных показателя. Приведены результаты исследования ее структурных, магнитных и транспортных свойств.

Поверхностная фаза 1×4 Gd на Si(001) была сформирована методом молекулярно-лучевой эпитаксии между подложкой и перенесенным на ее поверхность графеном. Структура поверхностной фазы была определена методом дифракции быстрых электронов.



Синтезированная поверхностная фаза представляет собой двумерный ферромагнетик, что было подтверждено данными исследований методом СКВИД-магнитометрии. Данная структура проявляет магнитные свойства, характерные для двумерных ферромагнетиков на основе  $4f$ -элементов, которым характерны редуцированные магнитные моменты, а также зависимость температуры перехода от слабых магнитных полей. В полевой зависимости намагниченности наблюдается гистерезис, исчезающий с ростом температуры.

Гальваномагнитные измерения свидетельствуют о спиновой поляризации носителей в графене. В системе наблюдаются аномальный эффект Холла с петлей гистерезиса и линейное магнитосопротивление, меняющее свой знак при изменении направления поля относительно направления тока, что свидетельствует о спиновой поляризации носителей и сильной магнитной анизотропии в плоскости пленки.

Для синтезированной структуры, как и для исходного графена на кремнии, характерна дырочная проводимость. Интеркаляция Gd под графен уменьшает концентрацию носителей на порядок, что свидетельствует о слабом электронном допировании графена поверхностной фазой Gd. В системе наблюдается высокая подвижность носителей заряда ( $\sim 3000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ), отражающаяся в появлении квантовых осцилляций. Эволюция амплитуды осцилляций с температурой позволила оценить эффективную массу носителей заряда. Увеличение массы более чем на порядок ниже температуры ферромагнитного перехода свидетельствует о формировании спиновых возбуждений вокруг носителей.

Данная работа показала возможность создания гетероструктур графена с  $4f$ -элементами, применимых в устройствах спинтроники на кремниевой платформе.

Работа выполнена при поддержке РНЦ «Курчатовский институт», РФ (20-79-10028, 22-13-00004, 24-19-00038). Работа Д.В. Аверьянова поддержана стипендией Президента РФ (СП-3111.2022.5).

#### Литература

1. D.V. Averyanov et al., ACS Appl. Mater. Interfaces, **10**, 20767-20774 (2018).
2. I.S. Sokolov et al., Mater. Horiz., **7**, 1372-1378 (2020).
3. I.S. Sokolov et al., J. Alloys Compd., **884**, 161078 (2021).
4. I.S. Sokolov et al., Small, **19**, 2301295 (2023).

## ДВУМЕРНЫЙ ФЕРРОМАГНЕТИЗМ ГРАФЕНИЗОВАННОГО GdAlSi

*\*И.С. Соколов<sup>1</sup>, Д.В. Аверьянов<sup>1</sup>, О.Е. Парфёнов<sup>1</sup>, А.Н. Талденков<sup>1</sup>, О.А. Кондратьев<sup>1</sup>,  
А.М. Токмачёв<sup>1</sup>, В.Г. Сторчак<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИИ «Курчатовский институт»

Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, дом 1

e-mail: [sokolov.ivan.qed@gmail.com](mailto:sokolov.ivan.qed@gmail.com)

## TWO-DIMENSIONAL FERROMAGNETISM OF GRAPHENIZED GdAlSi

*\*I.S. Sokolov<sup>1</sup>, D.V. Averyanov<sup>1</sup>, O.E. Parfenov<sup>1</sup>, A.N. Taldenkov<sup>1</sup>, O.A. Kondratev<sup>1</sup>,  
A.M. Tokmachev<sup>1</sup>, V.G. Storchak<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute»

Kurchatov Sq. 1, 123182 Moscow, Russia, e-mail: [sokolov.ivan.qed@gmail.com](mailto:sokolov.ivan.qed@gmail.com)

Two-dimensional (2D) magnetic systems gain interest due to novel magnetic phenomena stemming from quantum confinement [1]. Their susceptibility to external stimuli and the potential for stacking different materials in heterostructures make 2D magnets promising spintronic materials [2–4]. Therefore, scalable synthetic routes to produce new 2D magnetic materials are of high demand.

Here, we introduce the new layered honeycomb material GdAlSi with graphene-like layers. In the 2D limit, it is stable on Si. We study dependence of magnetic properties of the new material on the number of monolayers, down to one monolayer. In contrast to the tetragonal phase of bulk GdAlSi, the graphenized material exhibits an easy-plane ferromagnetic order. Thus, graphenization provides a viable route for synthesis of new 2D ferromagnets.

Двумерные магнитные материалы предоставляют широкие возможности исследования новых видов спинового упорядочения в условиях ограниченной размерности, а также получения необычных квантовых фаз [1]. Высокая чувствительность к различным видам воздействий (электромагнитного, механического, оптического, химического) и возможность создания гетероструктур делают двумерные магнитные материалы перспективными кандидатами на роль материалов компонентной базы компактной и энергоэффективной наноэлектроники [2–4].

В представляемом докладе приведены исследования магнитных свойств нового двумерного магнитного материала GdAlSi, полученного из тетрагональной фазы посредством графенизации – стабилизации слоистой гексагональной фазы в двумерном пределе.

Синтез нового материала производился методом молекулярно-лучевой эпитаксии на поверхности монокристаллического Si(111). Подложка слу-

жила матрицей, задающей ориентацию растущей пленки, что позволило получить фазу, нестабильную в объемных образцах. С целью наблюдения изменений в магнитной и электронной структуре вещества с толщиной были синтезированы пленки от 1 до 10 монослоев. Монокристаллическое качество пленок было подтверждено результатами дифракции быстрых электронов и рентгеновской дифрактометрии.

Измерения намагниченности образцов методом СКВИД-магнитометрии указывают на ферромагнитное упорядочение моментов, лежащих в плоскости пленки, что характерно для двумерных материалов на основе редкоземельных металлов [2–4]. Наблюдаемая зависимость температуры ферромагнитного перехода от слабых магнитных полей указывает на двумерную природу упорядочения. Для серии образцов разных толщин показана нелинейная зависимость ферромагнитного сигнала, нормированного на один атом Gd, от толщины пленки с максимумом при толщине в два монослоя. В полевой зависимости намагниченности нелинейность и петля гистерезиса наблюдаются вплоть до одного монослоя, а магнитный момент уменьшается с ростом температуры.

В транспортных измерениях магнитное упорядочение проявляется в аномальном эффекте Холла, исчезающем выше температуры ферромагнитного перехода, и отрицательном магнетосопротивлении, наблюдаемом до значительно более высоких температур, что свидетельствует о наличии ферромагнитных флуктуаций. При низких температурах в магнетосопротивлении наблюдается гистерезис.

Данные магнитных и транспортных исследований пленок гексагонального GdAlSi подтверждают, что графенизация может рассматриваться как перспективный путь создания новых двумерных ферромагнетиков, а новый материал, благодаря естественной интеграции с кремниевой платформой, может быть использован для создания устройств кремниевой спиновой электроники.

Работа выполнена при поддержке РНЦ «Курчатовский институт», РНФ (20-79-10028, 22-13-00004, 24-19-00038) и Министерства науки и высшего образования России (075-15-2021-1351). Работа Д.В. Аверьянова поддержана стипендией Президента РФ (СП-3111.2022.5).

#### Литература

1. C. Gong, X. Zhang, *Science*, **363**, eaav4450 (2019).
2. A.M. Tokmachev et al., *Nat. Commun.*, **9**, 1672 (2018).
3. A.M. Tokmachev et al., *Mater. Horiz.*, **6**, 1488-1496 (2019).
4. I.S. Sokolov et al., *Small*, **19**, 2301295 (2023).

**АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ И ИНТЕРФЕЙСОВ ВАН-ДЕР  
ВААЛЬСОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ СЛОЕВ hBN И MoS<sub>2</sub>**

*\*Н.Ю. Фролов<sup>1</sup>, А.Ю. Клоков<sup>1</sup>, А.И. Шарков<sup>1</sup>, А.Ю. Кунцевич<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН Россия, 119991, г. Москва  
Ленинский проспект, дом 53, e-mail: [frolil199999@gmail.com](mailto:frolil199999@gmail.com)

**ACOUSTIC PROPERTIES OF LAYERS AND INTERFACES OF VAN-DER WAALS  
HETEROSTRUCTURE BASED ON hBN AND MoS<sub>2</sub> LAYERS.**

*\*N.Yu. Frolov<sup>1</sup>, A.Yu. Klokov<sup>1</sup>, A.I. Sharkov<sup>1</sup>, A.Yu. Kuntsevich<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> P.N. Lebedev Physical Institute RAS Russia  
119991, Moscow, Leninskii pr. 53, e-mail: [frolil199999@gmail.com](mailto:frolil199999@gmail.com)

In this work, we use a laser hypersonic technique to study the mechanical properties of layered Van der Waals heterostructures, which included hBN layers of different thicknesses located on a glass substrate, as well as MoS<sub>2</sub> monolayers, in different experimental geometries. In the experiments, time dependences of changes in the reflectance of a thin aluminum film covering the structure were obtained and spectral analysis was carried out. It was found that the contact between hBN and the substrate can be described within the framework of an acoustic mismatch model. In addition, it was found that a MoS<sub>2</sub> monolayer significantly deteriorates the acoustic contact of heterostructure with the substrate.

На сегодняшний день исследования в области двумерных материалов являются довольно перспективными благодаря их уникальным физическим свойствам и огромной потенциальной применимости при создании на их основе широкого класса новых устройств. Работоспособность таких структур зависит от латеральной однородности слоев и качества межслоевых интерфейсов, которые могут существенно повлиять на их механические свойства, что в свою очередь влияет на транспорт зарядов и фононов. Поэтому исследование механических свойств на межслойных границах таких структур имеет первостепенное значение.

В представленной работе было проведено исследование упругих свойств слоев hBN разной толщины и их интерфейса с подложкой методом гиперзвуковой микроскопии, основанном на методике пикосекундного ультразвука. Сам эксперимент состоял в возбуждении фемтосекундным оптическим лазерным импульсом ультракоротких упругих импульсов в образце с их последующей оптической регистрацией. Подробно он описан в работе [1].

Объектами исследования являлись слои hBN, расположенные на стеклянной подложке и покрытые термически напылённой тонкой плёнкой алюминия толщиной  $\sim 30$  нм, служащей эффективным генератором упругих импульсов. Кроме того, была изготовлена и исследована структура с включённым между слоем hBN и подложкой монослоем  $\text{MoS}_2$ . Получение гетероструктур осуществлялось методом отслаивания Ван-дер Ваальсовых слоев с последующим их сухим горячим переносом на подложку в условиях окружающей среды.

Было реализовано две геометрии эксперимента: возбуждение когерентных фононов производилось со стороны алюминиевой пленки и со стороны подложки. В результате эксперимента были получены временные зависимости распространяющегося упругого импульса в различных частях структуры, после чего был произведен их Фурье-спектральный анализ. Было получено, что контакт hBN и подложки может описываться в рамках модели акустического рассогласования. Кроме того, установлено, что наличие монослоя  $\text{MoS}_2$  существенно портит акустический контакт гетероструктуры с подложкой.

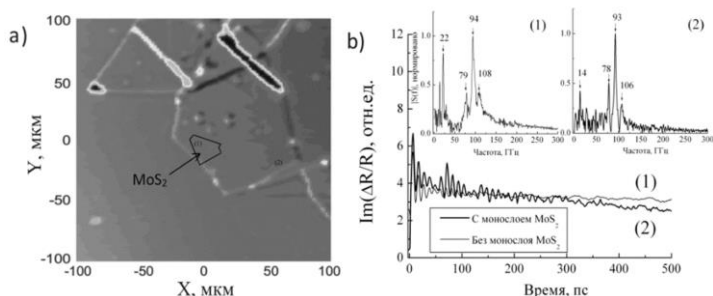


Рис. 1. *a)* Изображение образца, полученное при сканировании коэффициента отражения от структуры, отмечено место, где находится монослой  $\text{MoS}_2$ , а также точки сканирования; *b)* временные зависимости изменения фазы коэффициента отражения, полученные на структуре с монослоем и без монослоя, на вставках представлены Фурье-спектры полученных временных зависимостей

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2021-598 в ФИАН.

### Литература

1. А.И. Шарков, А.Ю. Клоков, Р.А. Хмельницкий, 12-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», Сборник трудов М.: НИЯУ МИФИ, 2021, с. 121–122.
2. F. Vialla, N.D. Fatti, *Nanomaterials* 10, 2543 (2020).

**ФОРМИРОВАНИЕ СКВИД КВАНТОВЫХ СЕНСОРОВ Nb/AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb  
С УМЕНЬШЕННОЙ ПАРАЗИТНОЙ ЕМКОСТЬЮ**

**\*И.С. Васильевский, М.С. Бурдыкин, С.А. Номоев, Ю.А. Тертышная, А.Н. Клочков,  
Н.И. Каргин**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [ivasilevskii@mail.ru](mailto:ivasilevskii@mail.ru)

**FABRICATION OF SQUID Nb/AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb QUANTUM SENSOR  
WITH REDUCED PARASITIC CAPACITANCE**

**\*I.S. Vasil'evskii, M.S. Burdykin, S.A. Nomoev, Yu. A. Tertyishnaya, A.N. Klochkov,  
N.I. Kargin**

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [ivasilevskii@mail.ru](mailto:ivasilevskii@mail.ru)

The technology blocks for Nb/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb SQUID quantum sensor with reduced parasitic capacitance were elaborated. For the tunnel dielectric atomic layer deposition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was used. Lower metallization performed by liftoff technique, while edge issue was solved by airbridge metallization assisted by grayscale electron beam lithography. The technology is applicable for detectors with suppressed parasitic resonances in the frequency range up to ~ 500 Hz due to the lower capacitance.

В области сенсорики СКВИД устройства имеют уникальные преимущества в ряде областей применений. Высокая чувствительность к магнитному полю, обеспечиваемая на основе квантового эффекта Джозефсона, позволяет применять данные устройства не только для прецизионного измерения малых магнитных полей, но и токов, напряжений и температуры [1]. Для целей термометрии используется спектральный анализ радиочастотного шума шунтирующего резистивного элемента в сверхпроводящем контуре [2, 3].

Традиционно формирование планарного джозефсоновского контакта (ДК) проводят по технологии in-situ напыления последовательно слоя металла, затем его контролируемого окисления с толщиной 2–8 нм, затем напыления верхнего металла. Такая конструкция требует удаления сплошного металла верхней обкладки вне ДК, например, анодным окислением [4]. Кроме того, нижний слой металлизации остается сплошным и является источником паразитной емкости при формировании верхнего контакта и верхнеуровневой разводки, например, контуров катушек связи. Для устранения этого недостатка возможно формирование узких контуров металлизации

путем технологии liftoff или обтравом металлизации нижнего уровня, однако, при этом возникает ряд проблем. Одна из проблем возникает из-за образования рельефа меза-структуры возвышающегося металла первого уровня. Другая проблема связана с краевой утечкой или пробоем диэлектрика на границе нахлеста двух металлических полосков. В-третьих, пленка собственного окисла оказывается достаточно толстой при формировании металлизации при помощи дополнительной литографии и жидкостной обработки.

В настоящей работе выполнено проектирование и тестирование элементов технологического маршрута формирования СКВИД сенсоров с планарными катушками и сниженной паразитной емкостью. Для улучшения стабильности туннельный барьер выполнен атомно-слоевым осаждением  $Al_2O_3$ . Такая технология применялась ранее, но в режиме in-situ формирования оксида [5]. Достигнуто пробивное напряжение ДК более 1,2 В. Для снижения краевых эффектов верхний уровень металлизации ДК выполнен мостовым опуском, плавный рельеф резистивной маски для последующего напыления металла формировался при помощи полутонковой электронной литографии на основе резиста РММА с автоматическим совмещением по меткам. Такой прием позволяет изготовить СКВИД с высокой степенью идентичности пары ДК (отклонение по площади менее 3 %).

В качестве нормального металла резистивного шунта при рабочих температурах устройства вплоть до 0,5 К можно использовать титан, палладий или вольфрам. Для введения внешнего магнитного потока конструкция датчика содержит трансформатор потока – сверхпроводящую катушку, состоящую из нескольких витков. Для разводки самопересекающегося контура использована технология воздушных мостов. Отработаны условия, при которых металлизация воздушного моста сохраняет жесткость и препятствует слипанию тонкой пленки металлизации с поверхностью подложки.

В результате разработаны элементы технологии СКВИД Nb/AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb со сниженной паразитной емкостью, что позволяет сдвинуть паразитные радиочастотные резонансы в область свыше ~ 500 Гц.

#### Литература

1. R.L. Fagaly, Review of Sci. Instruments, **77**, 101101 (2006).
2. A. Fleischmann, A. Reiser, C. Enss, Journal of Low Temperature Physics **201**, 803 (2020).
3. R. Wold, P. Weichman, M. Tondra, E. Lange et.al., UXO Forum 2000, Anaheim (2000).
4. H. Kroger, L. N. Smith, and D. W. Jillie, Applied Physics Letters **39**, 280 (1981).
5. R. Lu, A. J. Elliot, L. Wille, Bo Mao, S. Han, J. Z. Wu et.al., arXiv:1309.4410 [cond-mat.mtrl-sci] (2013).

**ПОЛУЧЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ NV-ЦЕНТРОВ В CVD АЛМАЗЕ  
МЕТОДОМ ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ**

**\**М.М. Калошин<sup>1</sup>, С.С. Вергелес<sup>1</sup>, А.С. Гусев<sup>1</sup>, Р.Е. Маргушин<sup>1</sup>, А.Т. Салказанов<sup>1</sup>,  
Н.И. Каргин<sup>1</sup>, Н.С. Кукин<sup>2</sup>, А.А. Бухтияров<sup>2</sup>***

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [MMKaloshin@mephi.ru](mailto:MMKaloshin@mephi.ru)

<sup>2</sup>Межрегиональное общественное учреждение «Институт Инженерной Физики»  
Россия, 142210, Московская обл., г. Серпухов, Б. Ударный пер., д. 1а

**GENERATION OF SINGLE NV-CENTERS IN CVD DIAMOND  
BY HIGH-ENERGY ELECTRON IRRADIATION**

**\**M.M. Kaloshin<sup>1</sup>, S.S. Vergeles<sup>1</sup>, A.S. Gusev<sup>1</sup>, R.E. Margushin<sup>1</sup>, A.T. Salkazanov<sup>1</sup>,  
N.I. Kargin<sup>1</sup>, N.S. Kukin<sup>2</sup>, A.A. Bukhtiarov<sup>2</sup>***

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)  
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31, e-mail: [MMKaloshin@mephi.ru](mailto:MMKaloshin@mephi.ru)

<sup>2</sup>Interregional public organization «Institute of Engineering Physics»  
Russia, 142210, Moscow Region, Serpukhov, B. Udamny per., 1a

The Nitrogen-Vacancy (NV) center in diamond offers unique photostability and quantum properties even at room temperature, which can be precisely manipulated using optical pumping and magnetic resonance techniques. This makes it suitable for a range of applications including single-photon sources, quantum cryptography, and nanoscale magnetic field detection. The primary challenge is to enhance the production of NV centers to precisely control their position, orientation, and density within the diamond matrix, which is crucial for broadening their application in quantum technologies.

Азотно-вакансионный центр окраски (NV) в алмазе представляет квантово-оптическую систему, которая показала высокий потенциал в качестве чувствительного магнитометра при комнатной температуре [1]. Ключевым аспектом для дальнейшего развития технологий и улучшения их квантовых свойств необходимо контролируемое получение NV-центров. Одним из способов получения центров окраски в алмазе является метод облучения высокоэнергетичными электронами [2].

В данной работе была проведена серия электронных облучений и последующий термический отжиг на образцах с эпитаксиальной алмазной пленкой, табл. 1.

Поиск одиночных NV – центров осуществлялся методом построения флуоресцентной карты поверхности образца с помощью конфокального



микроскопа. На рис. 1 слева приведено оптическое изображение поверхности, справа карта поверхности, где квадратами выделены одиночные NV – центры.

Таблица 1

**Параметры и характеристики образцов**

№ пластины	Ориентация кристаллической решетки	Толщина подложки, мкм	Толщина CVD, мкм	Доза облучения (e/cm <sup>2</sup> )	Время термического отжига (Мин)
1	111	345	~10–12	1e13	10
2	111	328	~10–12	1e14	10
3	111	388	~16–18	1e15	10

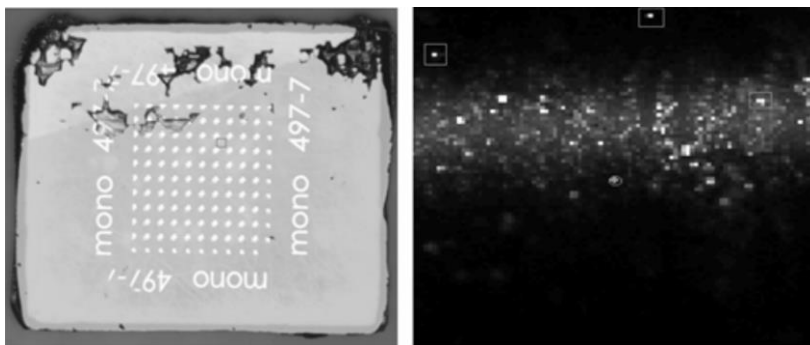


Рис. 1. Поверхность алмаза с выделенными точками свечения, соответствующими одиночным NV-центрам

Для дополнительного подтверждения результатов был использован оптически детектируемый магнитный резонанс, который позволил идентифицировать спиновые состояния NV-центров.

#### Литература

1. Jensen, Kasper, et al. «Cavity-enhanced room-temperature magnetometry using absorption by nitrogen-vacancy centers in diamond» Physical review letters 112.16 (2014).
2. A. M. Zaitsev, K. S. Moe, and W. Wang, Diamond Relat. Mater. 71, 38 (2017).

**РОСТ ОТДЕЛЬНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГРАФЕНА  
НА МЕДНОМ КАТАЛИЗАТОРЕ МЕТОДОМ CVD**

*\*Д.П. Борисенко<sup>1</sup>, М.Г. Рыбин<sup>2</sup>, К.П. Катин<sup>1</sup>, А.С. Гусев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31, e-mail: [DPBorisenko@mephi.ru](mailto:DPBorisenko@mephi.ru)  
<sup>2</sup>ООО «РУСГРАФЕН», г. Москва, ул. Угрешская, 2 стр 13

**THE GROWTH OF SINGLE GRAPHENE MONOCRYSTALS  
ON A COPPER CATALYST BY THE CVD METHOD**

*\*D.P. Borisenko<sup>1</sup>, M.G. Rybin<sup>2</sup>, K.P. Katin<sup>1</sup>, A.S. Gusev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [DPBorisenko@mephi.ru](mailto:DPBorisenko@mephi.ru)  
<sup>2</sup>R&D company «RUSGRAPHENE», Moscow, Ugreshskaya Street 2-13

Graphene is the most researched and well-known 2D material at the moment. It's unique electrophysical properties are widely used in many fields of industry and technology. An important task at the moment is to obtain high-quality defect-free graphene in the form of a monocrystalline film. The use of the CVD method to produce graphene on a copper catalyst makes it possible to obtain single-layer graphene of good quality and large area. After etching the copper catalyst, graphene can be transferred to any possible substrate and successfully used for various micro- and nanoelectronics devices. In this work, a CVD installation with a vertical reactor and cold walls manufactured by RUSGRAPHENE was used. Individual single crystals of graphene with an average size of ~100 microns have been synthesized. The quality of graphene was studied by Raman spectroscopy.

Графен-наиболее исследуемый и известный 2D-материал. Его уникальные электрофизические свойства находят широкое применение во многих областях промышленности и техники. Актуальной задачей на данный момент является получение качественного бездефектного графена в виде монокристаллической плёнки. Использование CVD-метода для получения графена на медном катализаторе, позволяет получать однослойный графен хорошего качества и большой площади. После травления медного катализатора, графен можно перенести на любую возможную подложку и успешно использовать для различных устройств микро- и нанoeлектроники.

Образцы графена были выращены CVD-методом на медной фольге толщиной 25мкм (чистота 99,9 %) с использованием метана (CH<sub>4</sub>) в качестве источника углерода, а затем перенесены на поверхность кремниевых пластин с термическим окислом (~ 300нм). Для эксперимента была использо-

вана изготовленная в компании ООО «РУСГРАФЕН» CVD-установка с вертикальным реактором и холодными стенками. Наличие в данной установке пирометра позволяет точно контролировать температуру процесса на всех этапах, что является значительным преимуществом данного реактора, в отличие от реактора вертикального типа с горячими стенками. После процедуры высокотемпературного отжига в среде водорода и аргона, в реактор при температуре 960–980 °С подавалось малое количество метана для роста графена на поверхности катализатора (рис. 1а). Перенос графена с поверхности меди на подложку проводился с использованием влажно-химического процесса переноса при комнатной температуре с использованием полимерного каркаса (PMMA). Медная фольга была полностью растворена в водном растворе персульфата аммония. Для удаления остатков травителя, графеновые образцы переносились в ёмкость с деионизированной водой, после чего образцы графена перемещались на целевую подложку (рис. 1б).

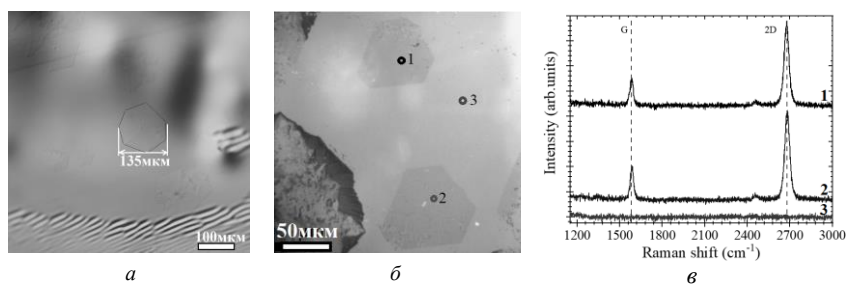


Рис. 1. РЭМ изображение графена на поверхности меди (а) и после переноса на целевую подложку (б). Результаты сканирования Рамановской спектроскопии (в)

Проведение высокотемпературного отжига в преимущественно водородной среде, позволило получить на наиболее разогретых участках медного катализатора отдельные монокристаллы графена со средним размером ~100 мкм. Качестве графена подтверждается результатами рамановской спектроскопии (рис. 1в), где отношение  $I_{2D}/I_G \sim 3$  с почти полным отсутствием D-пика.

**ПОДГОТОВКА МЕДНОГО КАТАЛИЗАТОРА ДЛЯ РОСТА КАЧЕСТВЕННОГО  
ГРАФЕНА МЕТОДОМ CVD В РЕАКТОРЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТИПА**

***\*Д.П. Борисенко<sup>1</sup>, М.Г. Рыбин<sup>2</sup>, К.П. Катин<sup>1</sup>***

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31, e-mail: [DPBorisenko@mephi.ru](mailto:DPBorisenko@mephi.ru)  
<sup>2</sup>ООО «РУСГРАФЕН», г. Москва, ул. Угрешская, 2 стр 13

**PREPARATION OF COPPER CATALYST FOR THE GROWTH  
OF HIGH-QUALITY GRAPHENE BY CVD METHOD IN A HORIZONTAL REACTOR**

***\*D.P. Borisenko<sup>1</sup>, M.G. Rybin<sup>2</sup>, K.P. Katin<sup>1</sup>***

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [DPBorisenko@mephi.ru](mailto:DPBorisenko@mephi.ru)  
<sup>2</sup>R&D company «RUSGRAPHENE», Moscow, Ugreshskaya Street 2-13

The production of graphene by the CVD method has become one of the most developing and promising technologies for producing high-quality graphene of a large area. In this work, a CVD installation with a vertical reactor and cold walls manufactured by RUSGRAPHENE was used. It was revealed that the use of an orthophosphoric acid solution for electrochemical polishing makes it possible to achieve a low roughness and a smooth surface on a copper catalyst. The use of a several-step annealing regime in a hydrogen and argon helps the recrystallization of copper and grain growth to centimeter sizes. Surface improvement and grain growth are an important component of improving the technology for producing large-area graphene on copper foil using the CVD method.

Получение графена методом CVD стало одним из самых развивающихся и перспективных технологий получения высококачественного графена большой площади. В реакторе с холодными стенками реализован постоянный точный контроль температуры образца с использованием пирометрии. При этом достигаются лучшие возможности по контролю процесса синтеза наноматериалов. В данной работе использована, изготовленная в компании ООО «РУСГРАФЕН», CVD-установка с вертикальным реактором и холодными стенками.

Получение высококачественного графена во многом зависит от подготовки и конечного качества поверхности металлического катализатора. Образцы графена были выращены на медной фольге толщиной 30 мкм (чистота 99,9 %) с использованием метана (CH<sub>4</sub>) в качестве источника углерода, а затем перенесены на поверхность кремниевых пластин с термическим окислом (~ 285 нм).

Процесс электрохимической полировки позволяет улучшить качество медного катализатора, сгладить поверхность и добиться малой шероховатости, которая в будущем позволяет уменьшить количество дефектов в слоях графена. В камере синтеза проводится высокотемпературный отжиг в среде активных газов. Высокочистые водород и аргон являются основными газами, используемые для процедуры высокотемпературного отжига.

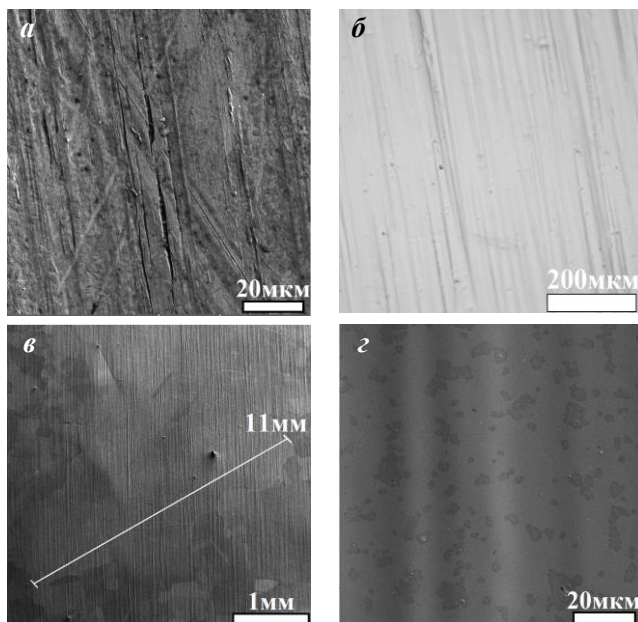


Рис. 1. РЭМ изображение поверхности медного катализатора до и после полировки (а, б), после процесса отжига (в) и синтеза графена (г)

Выявлено, что использование раствора ортофосфорной кислоты для электрохимической полировки позволяет добиться малой шероховатости и гладкой поверхности на медном катализаторе (рис. 1а, б). Использование несколько ступенчатого режима отжига в среде водорода и аргона помогает рекристаллизации меди и росту зерна до сантиметровых размеров (рис. 1в). Улучшение поверхности и рост зерна являются важной составляющей усовершенствования технологии получения графена большой площади на медной фольге методом CVD.

**ОДМР АНСАМБЛЕЙ NV-ЦЕНТРОВ В CVD-АЛМАЗЕ  
С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ИЗОТОПА  $^{13}\text{C}$**

*\*А.Т. Салказанов<sup>1</sup>, А.С. Гусев<sup>1</sup>, М.М. Калошин<sup>1</sup>, А.Д. Саури<sup>1</sup>, А.М. Жариков<sup>1</sup>,  
А.П. Низовцев<sup>1,2</sup>, С.Я. Килин<sup>1,2</sup>, Н.И. Каргин<sup>1</sup>, Р.В. Рыжук<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: [alik.salkazanov@inbox.ru](mailto:alik.salkazanov@inbox.ru)

<sup>2</sup>Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,  
Республика Беларусь, 220072, г. Минск, пр-т Независимости, 68-2

**ODMR OF NV CENTER ENSEMBLES IN CVD DIAMOND  
WITH DIFFERENT ISOTOPE CONTENT OF  $^{13}\text{C}$**

*\*A.T. Salkazanov<sup>1</sup>, A.S. Gusev<sup>1</sup>, M.M. Kaloshin<sup>1</sup>, A.D. Sauri<sup>1</sup>, A.M. Zharikov<sup>1</sup>,  
A.P. Nizovtsev<sup>1,2</sup>, S.Ya. Kilin<sup>1,2</sup>, N.I. Kargin<sup>1</sup>, R.V. Ryzhuk<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe Highway, 31, e-mail: [alik.salkazanov@inbox.ru](mailto:alik.salkazanov@inbox.ru)

<sup>2</sup>B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus,  
Republic of Belarus, 220072, Minsk, Nezavisimosti Ave., 68-2

Optical detectable magnetic resonance (ODMR) spectra were measured for NV center ensembles in CVD diamonds with different  $^{13}\text{C}$  content. The obtained spectra are described using a model based on the spin Hamiltonian. Using the constructed model and experimental data, the magnitude of the magnetic field applied to the sample was estimated.

Азотно-вакансионные центры (NV-центры) в алмазе являются основой для высокоэффективных квантовых сенсоров благодаря уникальному сочетанию высокого пространственного разрешения, высокой чувствительности к магнитному полю и возможности проводить измерения при комнатной температуре [1].

Кроме того, большой интерес представляют кристаллы алмаза с увеличенным содержанием изотопа углерода  $^{13}\text{C}$ . На заре изучения парамагнитных центров окраски в алмазе считалось, атомы  $^{13}\text{C}$  (ядерный спин  $I = 1/2$ ) являются основным фактором, снижающим время когерентности электронного спина NV-центра в алмазе высокой чистоты, и поэтому для некоторых применений их содержание стремились снизить. Но дальнейшие исследования показали, что изотоп  $^{13}\text{C}$ , благодаря сверхтонкой связи с NV-центром, может найти применения в квантовых технологиях, таких как разработка квантовых вентилях [2], квантовая магнитометрия [3], квантовая память [4], сенсоры вращения [5]. При исследованиях и разработках в этом направлении, большое значение имеет возможность эффективного измерения спектров ОДМР, а также их теоретического описания, для понимания процессов,

происходящих в исследуемом образце при приложении СВЧ и статического магнитного поля.

В данной работе для исследований используются алмазные образцы с  $\approx 1.1\%$ ,  $\approx 15\%$  и  $\approx 100\%$   $^{13}\text{C}$ . Получены спектры ОДМР в отсутствие и при приложении внешнего магнитного поля. Спектры описаны с помощью модели, основанной на спиновом гамильтониане. Кроме того, с использованием алмаза с  $\approx 1.1\%$ , а также с помощью модели, была измерена величина приложенного магнитного поля, а также возможные направления вектора магнитной индукции.

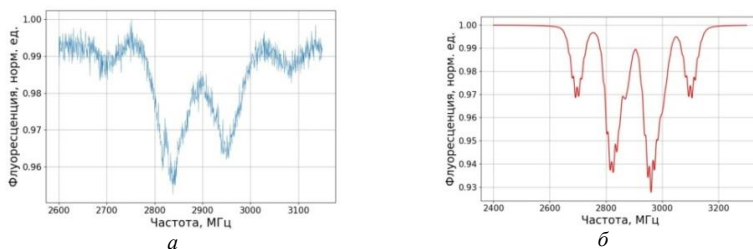


Рис. 1. Спектры ОДМР. *а*) Экспериментальный спектр от образца с  $\approx 100\%$  содержанием  $^{13}\text{C}$ ; *б*) модельный спектр

В модели использованы матрицы сверхтонкого взаимодействия между электронным спином NV – центра и ядерными спинами  $^{13}\text{C}$ , полученные в работе [6] методами квантовой химии. Для описания образца с  $\approx 100\%$   $^{13}\text{C}$  модель учитывает 12 ближайших к NV – центру атомов  $^{13}\text{C}$  рис. 1, из которого можно видеть, что модель хорошо воспроизводит экспериментальный спектр.

### Литература

1. M.W. Mitchell and S. Palacios Alvarez, «Colloquium: Quantum limits to the energy resolution of magnetic field sensors», *Rev. Mod. Phys.*, **92**, N 2, (2020).
2. Jelezko F, Gaebel T, Popa I, Domhan M, Gruber A, Wrachtrup J. Observation of coherent oscillation of a single nuclear spin and realization of a two-qubit conditional quantum gate. *PhysRevLett*, **93**, N 13 (2004) 1305013.
3. Nizovtsev, A.P., Kukin, N.S., Muradova, A.R. et al. Vector Magnetometry Using a Single NV– $^{13}\text{C}$  Complex in Diamond. *J ApplSpectrosc* **89**, (2023) 1064–1071.
4. Shim, Jeong & Niemeyer, Ingo & Zhang, Jingfu & Suter, D. Room-temperature high-speed nuclear-spin quantum memory in diamond. *Physical Review A*, **87**, (2012) 10.1103.
5. Ajoy, Ashok and Paola Cappellaro. «Stable three-axis nuclear-spin gyroscope in diamond» *Physical Review A*, **86** (2012) 062104.
6. Nizovtsev, A.P. & Kilin, Sergei & Pushkarchuk, Alexander & Pushkarchuk, V. & Kutsen, Si-amion & Zhikol, Oleg & Schmitt, Simon & Uden, T & Jelezko, F. (2018). Non-flipping  $^{13}\text{C}$  spins in NV diamond: Hyperfine and Spatial Characteristics by DFT Simulation of the C510[NV]H252 Cluster. *New Journal of Physics*, **20**, (2018) 10.1088/1367-2630/aaa910.

**СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФЕНА, ПОМЕЩЕННОГО  
НА ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОДЛОЖКИ**

*\*П.А. Кулямин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: [kulyamin.pavel@gmail.com](mailto:kulyamin.pavel@gmail.com)

**STRUCTURE AND ELECTRONIC CHARACTERISTICS OF GRAPHENE PLACED  
ON POLYELEMENTAL METAL SUBSTRATES**

*\*P.A. Kulyamin*

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [kulyamin.pavel@gmail.com](mailto:kulyamin.pavel@gmail.com)

In this work, nanostructures based on graphene placed on semiconducting substrates such as  $\text{AlCr}_2\text{C}$ ,  $\text{LaFeCuNi}_3$  and  $\text{SmMnCo}_3\text{Cu}$  have been investigated. Supercell models of the materials under investigation were created, and electronic properties such as the band structure and the density of electronic states have been calculated. For some materials, the effect of strain on electronic properties has also been investigated.

Одними из причин колоссального интереса научного сообщества к графену, являются его высокая прочность и аномально высокая подвижность носителей заряда. Настоящее исследование знакомит с графеном помещенным на полиэлементные металлические подложки. Такие двумерные наноструктуры расширяют потенциальные применения графена в различных устройствах таких как транзисторы и проводящие пленки [1].

Настоящее исследование направлено на изучение геометрии и электронных характеристик графена на подложках из  $\text{AlCr}_2\text{C}$ ,  $\text{LaFeCuNi}_3$  и  $\text{SmMnCo}_3\text{Cu}$ . На рис. 1 представлена кристаллическая структура графена на подложке из  $\text{SmMnCo}_3\text{Cu}$  с увеличенной на 4 % элементарной ячейкой.

Гетероструктуры моделируется с помощью суперячейки, которая содержит один монослой подложки и один монослой графена. Суперячейки графена и подложек выбраны с максимально возможной соизмеримостью, а именно для подложек из  $\text{LaFeCuNi}_3$  и  $\text{SmMnCo}_3\text{Cu}$ , была выбрана  $1 \times 1$  суперячейка подложки и  $4 \times 4$  ячейка графена. Для подложки на основе  $\text{AlCr}_2\text{C}$  была выбрана  $1 \times 1$  суперячейка подложки и  $2 \times 2$  суперячейка графена. Эффект небольшого несоответствия решетки на электронную структуру был хорошо продемонстрирован и описан в недавних расчетах для подобных гибридных структур на основе графена [2].



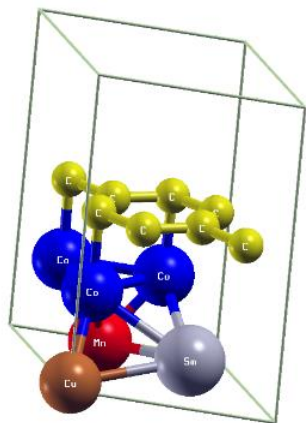


Рис. 1. Кристаллическая структура графена на подложке из  $\text{SmMnCo}_3\text{Cu}$  с увеличенной на 4 % элементарной ячейкой

Расчеты проводились в программном пакете QuantumEspresso [3]. Была использована теория функционала плотности с обобщенной градиентной аппроксимацией (GGA) в параметризации Пердю-Берка-Эрнзерхофа (PBE).

В результате работы были рассчитаны такие электронные характеристики графена на исследуемых подложках, как плотность электронных состояний и зонная структура. Также для графена на подложках из  $\text{LaFeCuNi}_3$  и  $\text{SmMnCo}_3\text{Cu}$ , было проведено исследование влияния продольных деформаций на электронные характеристики. Плотность электронных состояний и зонная структура для графена на подложке из  $\text{SmMnCo}_3\text{Cu}$  растянутого на 4 % представлена на рис. 2.

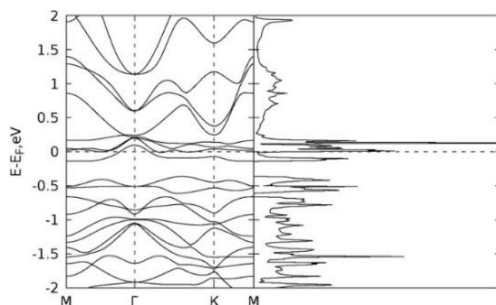


Рис. 2 Зонная структура и плотность электронных состояний графена на подложке из  $\text{SmMnCo}_3\text{Cu}$  с увеличенной на 4 % элементарной ячейкой

### Литература

1. Zhang Q., Wei Q., Huang K., [et al.]. Defects boost graphitization for highly conductive graphene films // National Science Review. 2023 May. Vol. 10. No. 7.
2. Yandong Ma, Ying Dai, Wei Wei. First-160 principles study of the graphene@mose2 heterobilayers. The Journal of Physical Chemistry 161 C, 115(41):20237–20241, Oct 2011.
3. K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, and A.A. Firsov. Electric field effect in atomically thin carbon films. Science, 306(5696):666–669, 2004.

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НОВЫХ АЛЛОТРОПОВ ГРАФЕНА

*\*К.П. Катин<sup>1,2</sup>, И.В. Березницкий<sup>1,2</sup>, М.М. Маслов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе 31, e-mail: [KPKatin@yandex.ru](mailto:KPKatin@yandex.ru)

<sup>2</sup>НИИ Проблем развития научно-образовательного потенциала молодежи  
Россия, 119620, г. Москва, ул. Авиаторов, 14/55

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE NOVEL GRAPHENE ALLOTROPES

*\*K.P. Katin<sup>1,2</sup>, I.V. Bereznitskiy<sup>1,2</sup>, M.M. Maslov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>National Research Nuclear university «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskor Shosse 31, e-mail: [KPKatin@yandex.ru](mailto:KPKatin@yandex.ru)

<sup>2</sup>DSEPY Research Institute  
Russia, 119620 Moscow, Aviatorov Street 14/55

Conventional graphene has several disadvantages, including zero band gap and the absence of adsorption sites. Graphene allotropes containing pentagons and larger rings can overcome these drawbacks while maintaining the unique characteristics of graphene (high mechanical strength and charge carrier mobility). Hundreds of graphene allotropes have been proposed based on computational design, but only a few have been obtained and characterized experimentally. Here we discuss the structure of hydrocarbon precursor molecule suitable for efficient self-assembly into a new 2D allotrope on a metal surface. Based on the experience obtained in the synthesis of graphyne and biphenylene, we formulated the requirements for such a precursor and provided a suitable example.

Аллотропы графена – это двумерные углеродные материалы, толщина которых составляет один атомный слой. В отличие от обычного графена, поверхность которого состоит из шестиугольных колец, аллотропы содержат дополнительно  $n$ -угольники, где  $n$  меняется от 3 до 18 и более. Как правило, аллотропы сохраняют высокую механическую прочность, характерную для графена. Однако, их электронное строение довольно разнообразно: в частности, среди них есть материалы с двумя конусами Дирака [1] и полупроводники с отличными люминесцентными свойствами [2]. Наличие колец большого диаметра удобно для осаждения ионов подходящего размера, что позволяет создавать сверхрешётки на поверхности этих материалов. Кроме того, поверхность аллотропов оказывается напряженной по сравнению с обычным графеном, что приводит к лучшим адсорбционным свойствам. Всё это объясняет интерес исследователей к аллотропам графена. Число аллотропов, предложенных путём компьютерного дизайна, уже пре-

вышает сотню. К сожалению, не все из них удаётся синтезировать. Экспериментально получены лишь несколько аллотропов – графин [3], бифенилен [4] и монослойный аморфный углерод [5]. Это связано с тем, что аллотропы менее энергетически выгодны, чем графен, из-за чего их сложнее синтезировать. Успешные примеры синтеза аллотропов основывались на самосборке углеводородных прекурсоров на поверхности металла. Мы сформулировали основные требования к такому прекурсор. Во-первых, он должен содержать пятиугольные кольца. Циклы меньшего размера ( $n = 3, 4$ ) хотя и возможны, представляются нам слишком напряженными. Наличие таких циклов приведет к низкой термической устойчивости молекулы и невозможности её обработки. Самопроизвольное формирование пятиугольных колец маловероятно, поскольку они обладают более высокой энергией по сравнению с шестиугольными. Поэтому необходимо, чтобы пятиугольные кольца изначально присутствовали в прекурсор. Во-вторых, молекула должна иметь три или четыре активных узла, обеспечивающих её связь с другими молекулами в процессе самосборки. Меньшее число активных узлов не позволит сформировать плоскую структуру. Вместо неё образуются полимерные цепочки, которые не сформируют кристаллического слоя. Большее количество активных узлов усложнит самосборку и увеличит вероятность образования дефектов. В-третьих, все активные узлы должны быть эквивалентными. Это поможет избежать «неправильного» соединения таких узлов. Для этого прекурсор должен обладать подходящей симметрией. Наконец, молекула прекурсора должна быть плоской. Плоская форма обеспечит правильную ориентацию всех молекул на металлической поверхности, необходимую для формирования слоя. Перечисленные требования не являются строго обязательными, но мы считаем, что они значительно облегчат процесс самосборки молекул. Оказалось, что очень немногие прекурсоры обладают перечисленными свойствами. После анализа большого числа углеводородов, представленных в химических базах данных, мы предложили молекулу циклотетрапентена в качестве перспективного прекурсора. Моделирование процесса самосборки методом Монте-Карло подтвердило её способность образовывать кристаллический двумерный слой. Работа поддержана РФФ, грант 23- 23-00432.

#### Литература

1. R.M. Tromer et.al, J. Phys. Chem. C **127** 12226 (2023).
2. N. Gao et.al, Angew Chem Int Ed. **61** e202204485 (2022).
3. G. Li et.al, Chem. Commun. **46** 3256 (2010).
4. Q. Fan et.al, Science **372** 852 (2021).
5. C.-T. Toh et.al, Nature **577** 199 (2020).

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, СТАБИЛЬНОСТИ И СВОЙСТВ ДИАМАНОВ,  
ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ НОВЫХ АЛЛОТРОПОВ ГРАФЕНА:  
КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ**

***\*Ю.А. Байетдинов***

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе 31, e-mail: [yabauetdinov@gmail.com](mailto:yabauetdinov@gmail.com)

**EXPLORATION OF STRUCTURES, STABILITY, AND PROPERTIES  
OF DIAMANES DERIVED FROM NEW GRAPHENE ALLOTROPES:  
A COMPUTATIONAL ANALYSIS**

***\*Yu.A. Bauetdinov***

National Research Nuclear university «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskor Shosse 31, e-mail: [yabauetdinov@gmail.com](mailto:yabauetdinov@gmail.com)

This research thoroughly examines eight carbon monolayer materials as potential precursors for bilayer C<sub>2</sub>H-diamanes. Using density functional theory calculations, a variety of band gaps were identified in these diamanes, suggesting a broadening of electronic and optical properties beyond traditional graphene derivatives. However, most structures lacked kinetic stability due to interlayer bond instability. Only three diamanes demonstrated definitive stability and suitability for high-temperature processing. These stable structures exhibited mechanical and optical properties, with Young's moduli similar to pristine graphene, offering valuable insights for potential applications.

Диаманы – это одни из наиболее активно изучаемых новых 2D углеродных материалов. Они получаются из двухслойного графена путем формирования межслоевых ковалентных связей [1]. С учётом успешного синтеза и применения диаманов, мы рассмотрели структуры, подобные диаманам, основанные на аллотропах графена. В данной работе мы провели вычислительное исследование восьми углеродных материалов, включая недавно синтезированный бифенилен [2], графин [3] и DHQ-графен [4], в качестве предшественников двухслойных C<sub>2</sub>H-диаманов [5].

Расчеты по теории функционала плотности показали, что рассматриваемые диаманы имеют широкий диапазон запрещенных зон, варьирующихся от 1,5 до 4,2 эВ. Диаманы, основанные на аллотропах графена, значительно расширяют спектр электронных и оптических свойств традиционных производных графена и других традиционных углеродных материалов. Из восьми рассмотренных структур, только три диамана были идентифицированы как определенно стабильные системы, пригодные для обработки при повышенных температурах около 500 К. Подход с использованием метода

подталкивания эластичной ленты (NEB) позволил понять шаги термического разложения, определяемые скоростью, и соответствующие энергетические барьеры, которые составляют 2,79, 4,86 и 5,41 эВ для трех стабильных аллотропов графена. Константы упругости рассмотренных аллотропов сопоставимы с теми, что у графена. Спектры поглощения аллотропов графена рассчитываются с использованием линейной отклика временно-зависимой теории функционала плотности.

Наше исследование демонстрирует, что формирование структур, аналогичных аллотропам графена, через ковалентное межслоевое связывание, не является эксклюзивным свойством только чистого графена. Многие аллотропы графена, включая недавно синтезированный графин [3] и бифенилен [2], могут формировать подобные структуры. Хотя большинство из них недостаточно кинетически стабильны, стабильность некоторых аллотропов графена сопоставима с той, что у чистого графена. В качестве первого шага мы рассмотрели упаковку AA из двух идентичных монослоев. Они представляют собой новый класс двухслойных двумерных углеродных материалов с более высокой изгибной жесткостью по сравнению с графеном. Такие материалы предлагают значительное расширение электронных свойств обычно используемого графена и биграфена. Отметим, что эксперименты с чистым графеном позволяют наблюдать как двухслойные, так и многослойные аллотропы графена. Аллотропы графена могут формировать структуры AA, подобные аллотропам графена, аналогичные чистому графену. Эти структуры демонстрируют широкие запрещенные зоны и расширяют спектр электронных свойств, типичных для монослоев. Однако не все структуры стабильны из-за напряженных межслоевых связей, которые имеют тенденцию к разрыву. Мы идентифицировали стабильные системы и определили их соответствующие пути разложения и барьеры. Они основаны на чистом графене, скварографене и 6,6,12-графине. Механические и оптические свойства стабильных структур были рассчитаны. Их модули Юнга сопоставимы с соответствующими значениями чистого графена, как это описано в нашей работе [5].

#### Литература

1. Chernozatonskii L. A. et al, Jetp Letters. **134** 90 (2009).
2. Q. Fan et.al, Science. **372** 852 (2021).
3. G. Li et.al, Chem. Commun. **46** 3256 (2010).
4. Liu Y. et al, Physical review letters. **108** 225505 (2012).
5. K.P. Katin et.al, FlatChem. **44** 100622 (2024).

**ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИАМАНОВ  
С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ УПАКОВКИ**

*\*А.А. Грекова<sup>1</sup>, М.М. Маслов<sup>1</sup>, К.П. Камин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: [ingo.tyan2@mail.ru](mailto:ingo.tyan2@mail.ru)

**ELECTRONIC AND OPTICAL PROPERTIES  
OF DIAMANES OF DIFFERENT TYPES OF PACKAGING**

*\*A.A. Grekova<sup>1</sup>, M.M. Maslov<sup>1</sup>, K.P. Katin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [ingo.tyan2@mail.ru](mailto:ingo.tyan2@mail.ru)

The diamane (C<sub>2</sub>H) is a diamond-like structure with  $sp^3$ -hybridized carbon atoms. This material can be obtained by deposition of hydrogen atoms on the outer sides of bilayer graphene. The diamane has different types of packages since before covalent bonding it is possible to control the angle of twist between the graphene layers. Then, this material has the range for band gap. So, the diamane can be either a wide-gap or narrow-gap semiconductor. Due to the covalent bonds between hydrogen and carbon atoms, the diamane has high mechanical strength and stiffness. Some electronic and optical properties of these systems were discussed in the presented study including Raman, IR, and optical spectra.

К настоящему времени установлено, что алмазоподобные слои особого типа, названные диаманами, относятся к классу полупроводников. Кроме того, их электронные и механические характеристики зависят от выбранной упаковки [1]. В настоящей работе мы сконструировали пять различных диамановых слоев с различной упаковкой и проанализировали их электронные и оптические характеристики. Были получены характеристические рамановские и ИК-спектры, а также рассчитаны оптические спектры.

Расчеты структурных, электронных и оптических характеристик проводились с помощью программного комплекса Quantum Espresso в рамках теории функционала плотности (DFT) с GGA функционалом PBE. Для исследования ИК и рамановских спектров был использованы подходы теории возмущений функционала плотности (DFPT) с использованием приближения LDA (приближение локальной плотности) в функциональной форме PW (Пердью-Ванга) для обменно-корреляционной энергии и псевдопотенциалов, сохраняющих норму Труллера-Мартинса для остовно-электронных взаимодействий. Спектры поглощения были рассчитаны с использованием

метода нестационарной теории функционала плотности (TD-DFT) с теми же псевдопотенциалами, сохраняющими норму.

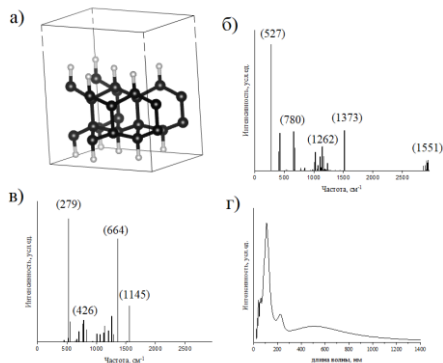


Рис. 1. Структура алмаза и его оптические спектры: а) кристаллическая решетка алмаза (бифенилен) [1]; б) спектр рамановского излучения, в) спектр инфракрасного излучения, г) спектр поглощения. Черные атомы – углерод, серые атомы – водород

Мы получили спектры оптического поглощения алмазов различных упаковок. Пример такого спектра представлен на рисунке 1(г). Рассчитанные спектры для большинства исследуемых алмазов показали максимум поглощения  $\sim 100$  нм, что соответствует дальней УФ-области. Стоит отметить, что в случае алмаза бифенилена (рис. 1а), поглощается также и оптическое излучение с максимумом на длине волны 510 нм.

Установлено, что характеристические пики на рамановских и инфракрасных спектрах (527, 780, 1262, 1373, 1551  $\text{см}^{-1}$ , а также 279, 426, 664, 1145  $\text{см}^{-1}$  соответственно), показанные на рисунке 1(б, в), соответствуют колебаниям валентных связей между атомами водорода и углерода, что может быть использовано в дальнейшем для экспериментальной идентификации алмазов различной конфигурации, помещенных на диэлектрические или металлические подложки.

Благодаря своим уникальным оптическим, электронным и механическим свойствам алмазы являются перспективными материалами для приложений электроники, наноэлектроники, спинтроники и других смежных областей.

## Литература

1. K.P. Katin et al., FlatChem **44**, 100622 (2024).

**ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКОВ ВОДОРОДА  
ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ТЕСТОВ В МЕДИЦИНЕ**

**\**М.О. Этрекова<sup>1</sup>, А.В. Литвинов<sup>1</sup>, Н.Н. Самотаев<sup>1</sup>, И.Д. Певцов<sup>1</sup>, К.Ю. Облов<sup>1</sup>,  
Д.Г. Бухаров<sup>2</sup>, В.М. Демидов<sup>2</sup>***

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: [moetrekova@mephi.ru](mailto:moetrekova@mephi.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1

**DECREASING THE RESPONSE TIME OF HYDROGEN GAS SENSORS  
FOR DIAGNOSTIC BREATH TESTS IN MEDICINE**

**\**M.O. Etrekova<sup>1</sup>, A.V. Litvinov<sup>1</sup>, N.N. Samotaev<sup>1</sup>, I.D. Pevtsov<sup>1</sup>, K.Yu. Oblov<sup>1</sup>,  
D.G. Bukharov<sup>2</sup>, V.M. Demidov<sup>2</sup>***

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [moetrekova@mephi.ru](mailto:moetrekova@mephi.ru)

<sup>2</sup>National Research University Moscow Power Engineering Institute  
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st. 14, build 1

The influence of periodic annealing on the capacitive hydrogen gas sensor performance has been studied, and recommendations for operating temperature conditions have been developed.

Дыхательные тесты в медицине известны как неинвазивный метод диагностики различных заболеваний [1, 2]. Среди анализируемых газов  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $CO_2$  и др. с диапазоном измеряемых концентраций от единиц до сотен ppm. Эффективная работа при поточном обследовании пациентов может быть реализована с использованием анализаторов на основе газовых датчиков [3]. Однако при работе в указанном диапазоне концентраций характерные времена отклика ( $\tau_{0,9}$ ) и релаксации ( $\tau_{0,1}$  и  $\tau_{полн.}$ ), т.е. возврата к нулевым показаниям, таких датчиков в сумме составляют порядка 15–30 мин, что затрудняет экспресс-диагностику. Для повышения быстродействия в этом случае часто применяют режим периодического отжига или импульсный нагрев [4]. Настоящий доклад представляет результаты исследования влияния рабочей температуры и режимов ее модуляции на быстродействие и стабильность измерений концентрации водорода датчиками на основе емкостных МДП-структур.

Исследуемые датчики изготовлены с применением технологий импульсного лазерного осаждения и адаптивной лазерной микрофрезеровки и состоят из МОП-структуры типа  $Pd/Ta_2O_5/SiO_2/Si$ , нагревательного элемента и датчика температуры, смонтированных в корпус из высокотемпературной керамики [5]. Принцип работы датчика состоит в изменении его электроем-



кости под действием анализируемого газа, которое регистрировалось измерительной схемой по методу делителя [6]. Программное обеспечение газоанализатора предусматривало возможность управления нагревом датчика в установленном пользователем режиме. Испытания по водороду проводились в статическом режиме (объемное разбавление) на атмосферном воздухе с использованием баллона ПГС 0,5 %  $H_2$  в воздухе, а также генератора  $H_2$ .

Датчик был отградуирован по концентрациям от 2,5 ppm до 0,5 %  $H_2$  в режиме непрерывного нагрева  $T_{дат.} = 120,0 \pm 0,2$  °С. Значения характерных времен реагирования составили в среднем, мин:  $\tau_{0,9} = \tau_{0,1} = 5$ ,  $\tau_{полн.} = 10$ , т.е. на одно измерение потребовалось  $\approx 15$  мин. Затем был исследован режим с периодическим отжигом датчика при  $t_{цикл\ изм.} = 5$  мин (рис. 1).

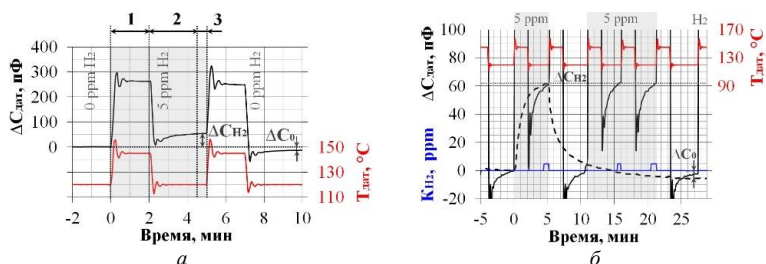


Рис. 1. – (а) Пятиминутный цикл измерения в режиме периодического отжига. (б) Сравнение быстрейдействия датчика в режиме непрерывного нагрева (пунктирная линия) и периодического отжига (сплошные линии). Обозначения: 1 – отжиг при 145 °С; 2 – остывание до 120 °С; 3 – регистрация результата измерения  $K_{H_2}$ ;  $\Delta C_{H_2}$  – величина изменения электроемкости датчика (отклика) на 5 ppm  $H_2$ ;  $\Delta C_0$  – уход нуля от базового уровня

Результаты экспериментов показали: а) периодический отжиг в 2–3 раза сокращает длительность одного измерения и режима прогрева датчика, а также уменьшает эффект ухода нуля от базового уровня (рис. 1б); б) при  $t_{цикл\ изм.} \approx \tau_{0,9}$  параметры градуировки датчика не зависят от температурного режима работы, что позволяет существенно ускорить процесс калибровки.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ: № FSWU-2022-0022 «Низкотемпературные керамические технологии (LTCC) в микроэлектронике».

### Литература

1. P. Malfetheriner et al. The consensus reports. Gut, 2022, 71, 1724–1762.
2. М.А. Дмитриенко. Практическая медицина, 2014, 1, 77, 192–200.
3. S. Feng et al. Sensors, 2019, 19, 3760.
4. W. Tang et al. ACS Nano, 2022, 16, 7, 10968–10978.
5. N. Samotaev et al. Sensors, 2023, 23(1), 514.
6. Н.Н. Самотаев и др. Датчики и системы, 2019, 5, 236, 47–53.

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗДЕЛЕНИЮ ПЕРВОНАЧАЛЬНО  
ГОРЯЧИХ ГЕМИНАЛЬНЫХ ПАР В ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ  
С НЕДИАГОНАЛЬНЫМ БЕСПОРЯДКОМ**

*\*А.В. Торопин, В.Р. Никитенко*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [arty.toropa@yandex.ru](mailto:arty.toropa@yandex.ru)

**ANALYTICAL TREATMENT OF SEPARATION OF INITIALLY HOT GEMINATE  
PAIRS IN ORGANIC MATERIALS WITH OFF-DIAGONAL DISORDER**

*\*A.V. Toropin, V.R. Nikitenko*

National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [arty.toropa@yandex.ru](mailto:arty.toropa@yandex.ru)

It is well known that disordered organic materials are subject to localization, so that transport of hot carriers after optical excitation in these materials is carried out by hopping through localized states. This phenomena, can be modelled by the Monte-Carlo method, but in the presence of spatial disorder this computation becomes too time consuming. For the latter case we have developed an analytical model which aims to estimate photogeneration efficiency in material when electric field is present and validate our understanding of physical picture. We exploit the effective temperature method to account for the electric field. The model predicts the violation of the Einstein's relation on rather short initial time interval hence separation probability increases as compared to the Onsager's model. Comparison between the model and the Monte-Carlo calculations shows that spatial ordering significantly increases the separation probability at low temperatures.

Пространственный (недиагональный) и энергетический (диагональный) беспорядки являются неотъемлемым свойством неупорядоченных органических фотопроводников, в которых транспорт носителей заряда осуществляется путём прыжков по локализованным состояниям [1]. При фотогенерации в таких материалах экситон переходит в геминальную пару (ГП) [2] горячих носителей заряда. Эффективность фотогенерации в неупорядоченных органических материалах пропорциональна вероятности разделения ГП. Эту вероятность в отсутствие недиагонального беспорядка рассчитывали методом Монте-Карло (МК), и она на несколько порядков превосходит результат классической модели Онзагера [3]. Сложности МК-моделирования возрастают при наличии недиагонального беспорядка. Предлагаемая модель решает задачу аналитически.

Разработана аналитическая модель сильно неравновесного прыжкового транспорта с учётом начальной энергетической релаксации и рассчитана вероятность разделения геминальных пар в случае гауссовского распределения локализованных состояний при наличии внешнего электрического поля, влияние которого было учтено методом эффективной температуры [4], модифицированным в данной работе:

$$\Omega_{\infty}(r_0^{\text{eff}}, T, F) = \exp[-e^2/(4\pi\epsilon\epsilon_0 r_0^{\text{eff}}(T)kT_{\text{eff}}(r_0^{\text{eff}}, T, F))],$$

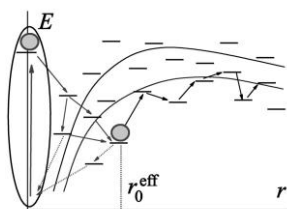


Рис. 1. Схема термализации и разделения геминальной пары

где  $T_{\text{eff}}$  – эффективная температура;  $r_0^{\text{eff}}$  – эффективное начальное разделение близнецов, которое равно расстоянию между ними в момент времени, когда подвижный носитель (в данном случае электрон, дырка находится в начале отсчёта) перестаёт совершать преимущественно прыжки вниз по энергии. Далее транспорт контролируется термоактивированными прыжками на транспортный уровень [5], см. рис. 1.

Диффузия аномально сильна на начальном временном интервале (прыжки вниз), так что нарушается соотношение Эйнштейна. [6]. Эффект особенно выражен при малой температуре, поэтому вероятность разделения получается больше, чем в модели Онзагера, и медленнее убывает с температурой, в согласии с известным экспериментом и МК-моделированием. С ростом диагонального беспорядка вероятность разделения увеличивается, недиагонального – уменьшается.

Работа выполнена при поддержке РНФ, соглашение № 22-22-00612.

#### Литература

1. H. Bäessler, *Physica Status Solidi (b)* **175**, 15 (1993).
2. M. Pope, H.E. Swenberg. *Electronic processes in organic crystals and polymers*. Oxford Univ. Press, Oxford, 1999.-1351 p.
3. U. Albrecht, H. Bäessler, *Chem. Phys. Lett.* **235**, 389 (1995).
4. S. Marianer, V.I. Shklovskii, *Phys. Rev. B* **46**, 13100 (1992).
5. В.Р. Никитенко, *Физ. Техн. Полупров.* **26**, 1438 (1992).
6. A.V. Toropin, V.R. Nikitenko, N.A. Korolev, O.V. Prezhdo, *J. Phys. Chem. Lett.* **14**, 7892 (2023).

**ЭЛЕКТРОННАЯ ПОДВИЖНОСТЬ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ: МОДЕЛИРОВАНИЕ  
МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО МОНТЕ-КАРЛО**

*\*Н.А. Королев, В.Р. Никитенко*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

**ELECTRON MOBILITY OF DISORDERED ORGANIC SEMICONDUCTORS:  
THE KINETIC MONTE CARLO SIMULATION**

*\*N.A. Koroley, V.R. Nikitenko*

National Research Nuclear University «MEPhI»  
115409, Russian Federation, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, e-mail: [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)

The dependence of mobility on charge carrier concentration and temperature is simulated using the kinetic Monte Carlo method. An algorithm and a program in C++ were developed and simulation of drift mobility was carried out for various values of the  $E_0$  of the Gaussian distribution and temperature. The Coulomb interaction is taken into account. The dependence of mobility on the  $E_0$  and concentration without taking into account Coulomb interactions is common within the framework of the Gaussian Disorder Model. Taking into account Coulomb interactions, mobility increases at moderate disorder and vice versa at strong disorder.

Методом кинетического Монте-Карло моделируется зависимость подвижности от концентрации носителей заряда и температуры. Разработан алгоритм, программа на языке C++ и выполнено моделирование дрейфовой подвижности для различных значений характерных энергий  $E_0$  гауссова распределения. Рассматриваемый объём органического материала содержит  $100 \times 100 \times 5 = 5 \cdot 10^5$  прыжковых центров с энергиями  $E$ , распределенными по Гауссову закону,  $g(E) = \exp(-E^2/E_0^2)/(\sqrt{2}E_0)$ . Геометрия соответствует полевому транзистору. Значение напряжённости поля,  $F = kT/(ea_0)$ , выбрано достаточно большим, чтобы исключить влияние диффузии, и достаточно малым, чтобы не искажать существенно зависимость подвижности от температуры и концентрации в пределе слабого поля. Учитывается кулоновское взаимодействие на расстояниях между носителями не больше радиуса Онзагера  $r_c = e^2/4\pi\epsilon_0 kT$ , где  $\epsilon = 3,5$ . Влияние зеркального заряда вблизи электрода учитывалось, пока носитель находится на расстоянии от электродов, не превышающих радиус Онзагера.

Электроны совершают термоактивированные туннельные прыжки с квазиуровня Ферми электрода в локализованные состояния. Энергия Ферми  $E_F$  определяется, исходя из концентрации электронов. Инжектируемые электроны генерируются в первом (приэлектродном) слое случайным образом согласно квазиравновесному энергетическому распределению.

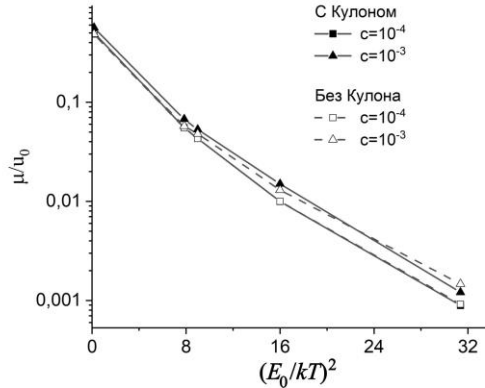


Рис. 1. Зависимость подвижности от параметра беспорядка  $(E_0/kT)^2$ .  
 $T = 300 \text{ K}$ ,  $\mu_0 = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ; изменяется  $E_0$

Полученные результаты (рис. 1) при малой концентрации согласуются с известными [1] данными о температурной и полевой зависимостях подвижности, а именно  $\mu/\mu_0 = \exp[-C(E_0/kT)^2]$ ,  $C = \text{const}$ . С ростом относительной концентрации носителей подвижность возрастает тем больше, чем больше беспорядок [2, 3]. Известные данные о влиянии микроскопических кулоновских взаимодействий на подвижность противоречивы. Наше моделирование при умеренном беспорядке даёт возрастание подвижности при учёте кулоновских взаимодействий, что согласуется с аналитическим результатом работы [2] и противоречит численным расчётам работы [3], и наоборот – при большом беспорядке.

#### Литература

1. Bassler H 1993 Phys. Stat. Sol. B 175 15.
2. Nikitenko V R and A Yu Saunina 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 498 012046.
3. van der Holst J J M et al 2011 Physical Review B 83 085206.

## ЭЛЕКТРОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУМЕРНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПЕРОВСКИТА И ГРАФЕНА

\**Л.С. Зубков<sup>1</sup>, М.М. Маслов<sup>1</sup>, К.П. Катин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, e-mail: [levazubkov@gmail.com](mailto:levazubkov@gmail.com)

## ELECTRONIC CHARACTERISTICS OF THE TWO-DIMENSIONAL COMPOSITE BASED ON PEROVSKITE AND GRAPHENE

\**L.S. Zubkov<sup>1</sup>, M.M. Maslov<sup>1</sup>, K.P. Katin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe Highway 31, e-mail: [levazubkov@gmail.com](mailto:levazubkov@gmail.com)

Van der Waals materials with layered structures have attracted much attention due to their potential applications. A special subclass of these materials are structures with hexagonal symmetry and features in electronic properties, such as the Dirac cone in the band structure. In the presented work, the heterostructure of a single-layer hexagonal perovskite  $\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9$  and graphene (Gr) was studied. We calculated the structure of  $\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9$  using the density functional theory. Its lattice parameter is equal to 7.46 Å. We obtained that it is a direct gap semiconductor with a 2 eV band gap. For the  $\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9/\text{Gr}$  structure, it was found that the Fermi energy can be shifted downward from the Dirac point, which can be used to create the optoelectronic devices.

$\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9$  представляет собой <111>-ориентированный перовскит с общей формулой  $\text{A}_3\text{B}_2\text{X}_9$ , где А и В – одновалентный и трехвалентный катионы соответственно, X – галоген (рис. 1). Семейство таких перовскитов представляет собой слоистые структуры с гексагональной симметрией. Слои удерживаются между собой силами Ван-дер-Вальса. Эти материалы могут оказаться полезными для солнечной энергетики [1].

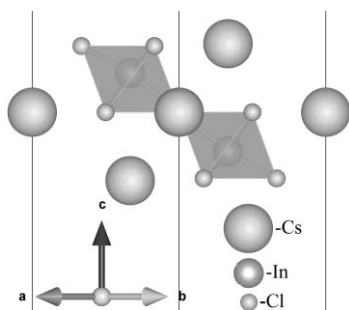


Рис. 1. Оптимизированная ячейка  $\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9$

В работе представлены результаты вычислений электронной зонной структуры монослоя  $\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9/\text{Gr}$  с помощью теории функционала плотности. Для расчётов использовался программный пакет Quantum Espresso с функционалом PBE и PAW-псевдопотенциалами. Вдоль оси z во избежание нефизических взаимодействий между объектом и его образом добавлено 20 Å вакуума.

На рис. 1 изображена оптимизированная ячейка монослоя  $\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9$ . Элементарная ячейка состоит из двух галогенных октаэдров, связанных между собой общим атомом хлора, внутри которых находится атом индия. Индий немного смещён от центра октаэдра, что говорит о возможных сегнетоэлектрических свойствах кристалла. В результате оптимизации постоянная решётки оказалась равной 7.46 Å.

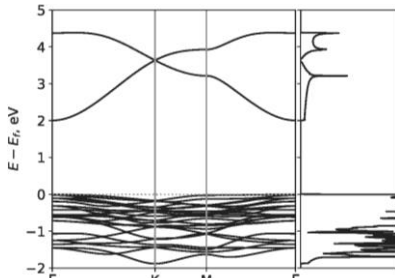


Рис. 2. Зонная структура и плотность состояний  $\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9$

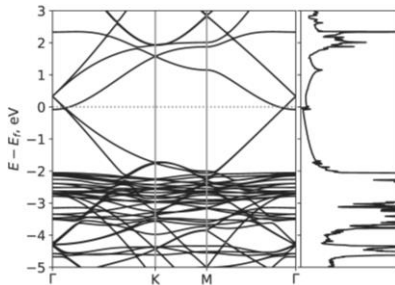


Рис. 3. Зонная структура и плотность состояний  $\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9/\text{Gr}$

Ферми относительно точки Дирака графена на 0.3 эВ, что может быть полезно при создании оптоэлектронных устройств нового поколения [3].

#### Литература

1. Luo Q. et al., *Advanced Theory and Simulations* 7, 2300988 (2024).
2. Laref, A. et al., *Carbon* 81, 179 (2015).
3. Adhikari S. et al., *Nanoscale* 8, 18710 (2016).

Расчет электронной зонной структуры  $\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9$  показал, что ширина полупроводниковой щели составляет 2 эВ. Из рис. 2 видно, что в точке K наблюдается конус Дирака. Затем на систему  $\text{Cs}_3\text{In}_2\text{Cl}_9$  нанесли монослой графена.

С учётом поправки D3-Grimme, позволяющей принять во внимание слабое ван-дер-ваальсово взаимодействие, расстояние между слоями составило 3.56 Å. Связи в слое графена прочнее чем в подложке из перовскита, поэтому структура сжимается. Вместе с этим происходит изменение валентных углов Cl-In-Cl. Отметим, что размещение графена на подложке из перовскита приводит к исчезновению диэлектрической щели в композите (рис. 3).

При этом конус Дирака для графена перемещается в точку Г [2]. На рис. 3 видно, что у полученной структуры наблюдается смещение уровня

**РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

*\*И.С. Васильевский<sup>1</sup>, П.В. Некрасов<sup>1</sup>, И.Е. Алимов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: [ivasilevskii@mail.ru](mailto:ivasilevskii@mail.ru)  
<sup>2</sup>ГБОУ школа № 853, г. Зеленоград

**DEVELOPMENT AND TESTING OF EXPERIMENTAL SETUP  
FOR HIGH TEMPERATURE SEMICONDUCTOR DEVICES MEASUREMENTS  
IN MAGNETIC FIELD**

*\*I.S. Vasil'evskii<sup>1</sup>, P.V. Nekrasov<sup>1</sup>, I.E. Alimov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe shosse 31, e-mail: [ivasilevskii@mail.ru](mailto:ivasilevskii@mail.ru)  
<sup>2</sup>SBEE School № 853, Zelenograd

Equipment for high-temperature measurements of semiconductor materials and devices in the temperature range up to 210 °C has been designed, assembled and tested. The temperature dependences of the resistance and sensitivity of magnetic field sensors based on new materials – polycrystalline InAs on sapphire – have been studied.

Вследствие постоянного расширения области эксплуатации электронной компонентной базы требуется развитие методов исследований полупроводниковых структур и приборов на их основе в область как низких, так и высоких температур. Высокотемпературные измерения полезны, в частности, для определения времени наработки на отказ по методике ускоренного тестирования. Однако, для комплексного изучения на уровне свойств материала требуется не только исследование проводимости и вольт-амперных характеристик, но и измерение эффекта Холла в магнитном поле, например, для определения температурного дрейфа коэффициента чувствительности.

В настоящей работе выполнено конструирование, создание и апробация стенда для проведения измерений при температурах вплоть до 210 °C, а также исследование параметров датчиков магнитного поля на основе поликристаллических нанопленок InAs на подложках сапфира с различной конфигурацией чувствительного слоя.

Для изготовления оснастки стенда был использован дюраль, алюминиевая обмотка соленоида с лаковым покрытием, устойчивым вплоть до 250 °C. Создана термостойкая вставка Ø15 мм в соленоид для размещения одновременно до 4-х образцов в магнитном поле. Для обеспечения цикла



измерений разработана контрольно-измерительная система с автоматизированным управлением. Для измерения температуры применялся платиновый тонкопленочный термометр сопротивления. Стенд позволяет проводить долговременные измерения в различном магнитном поле до 0,1 Тл и в интервале температур до 210 °С.

Для примера на рис. 1 приведены измеренные температурные зависимости коэффициента чувствительности датчиков магнитного поля на основе InAs толщиной от 30 нм до 200 нм на подложке Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Определены температурные коэффициенты удельного сопротивления (ТКС) и температурные коэффициенты чувствительности по току (ТКЧ), минимальные значения соответствуют ТКС = -0,022 % на градус Цельсия, ТКЧ = -0,025 % на градус Цельсия.

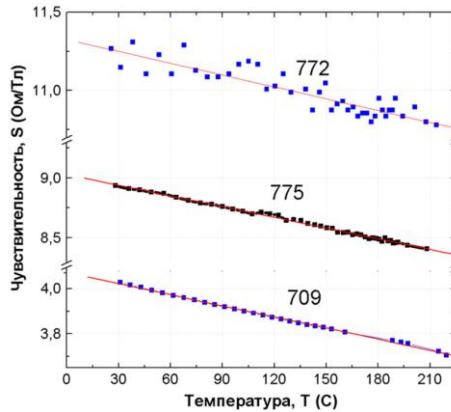


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента чувствительности датчиков магнитного поля на основе InAs толщиной от 30 нм до 200 нм на подложке Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Разработанный стенд и оснастка позволяют проводить измерения в области высоких температур и впоследствии, использовать его для определения энергии активации отказов по методике ускоренного тестирования.

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СМЕШАННЫХ ОКСИДОВ  
ДЛЯ СЕНСОРОВ И АКТУАТОРОВ**

***В.С. Федосенко, М. Эм, В.В. Янушкевич, \*Г.Г. Горох***

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, БГУИР  
Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, дом 6, e-mail: [gorokh@bsuir.by](mailto:gorokh@bsuir.by)

**INTELLIGENT MATERIALS BASED ON MIXED OXIDES  
FOR SENSORS AND ACTUATORS**

***V. Fedosenko, M. Em, V. Yanushkevich, \*G. Gorokh***

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, BSUIR  
Belarus, 220013 Minsk, Brovki Str. 6, e-mail: [gorokh@bsuir.by](mailto:gorokh@bsuir.by)

Smart metal oxide materials of the Zr–Ti–Pb–O system were formed by deposition from colloidal solutions onto matrices of titanium metal oxide nanostructures; their microstructure and composition were studied by scanning electron microscopy and X-ray energy dispersive microanalysis.

Смешанные металлоксиды соединений Bi–Ti–O; Bi–Fe–O; Ti–Pb–O; Zr–Te–O и др. в зависимости от состава композиции проявляют свойства активных интеллектуальных материалов, например, сегнето- и пьезоэлектрики, термоэлектрики, либо пассивных интеллектуальных материалов, например, газочувствительные, фотовольтаические и фотокаталитические пленки [1]. Ранее мы обсуждали формирование наноструктурированных сплошных металлоксидных пленок методом ионного наплавления, но им затруднено нанесение металлоксидов на локальные области конструктивных элементов устройств [2–4]. В настоящей работе рассматривается способ формирования интеллектуальных металлоксидных материалов системы Zr–Ti–Pb–O путем осаждения из коллоидных растворов на матрицы титановых металлоксидных наноструктур и исследование их морфологии и состава.

Металлоксидный композит формировали в два этапа. Сначала биметаллическую систему Ti/Al (Ti – 200 нм, Al – 1 мкм) анодировали в верхний слой алюминия преобразовывался в матрицу пористого оксида алюминия. Затем полученную систему анодировали в потенциодинамическом режиме в 0,1 М растворе лимонной кислоты с разверткой потенциала 1 В/с до 280 В. Процесс анодирования прекращали при снижении тока до 60 мкА/см<sup>2</sup>. После чего сформированный пористый оксид алюминия удаляли в 50 % H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> при 50 °С. В результате на поверхности подложки остались наноразмерные выступы TiO<sub>2</sub> (рис. 1а). Для получения свинец-циркониевых оксидных композиций сначала готовили раствор

нитратов этих металлов путем растворения 10 г  $Zr(NO_3)_2$  в 20 мл деионизованной воды и 30 г  $Pb(NO_3)_3$  в 20 мл деионизованной воды. Растворы смешивали, осаждение гидроксидов свинца и циркония осуществляли водным раствором  $NH_3$  (30 % мас.) до значения  $pH = 7,5$ . Коллоидный раствор гидроксидов (золь), полученный после очистки наносили дозами по 2 мкл на поверхность матрицы со столбиками  $TiO_2$  с последующим центрифугированием и сушкой при  $70\text{ }^\circ\text{C}$ . В заключение образцы отжигали в муфельной печи при  $700\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 40 мин. На рис. 1 приведены микрофотографии и результаты EDX исследований сформированных структур.

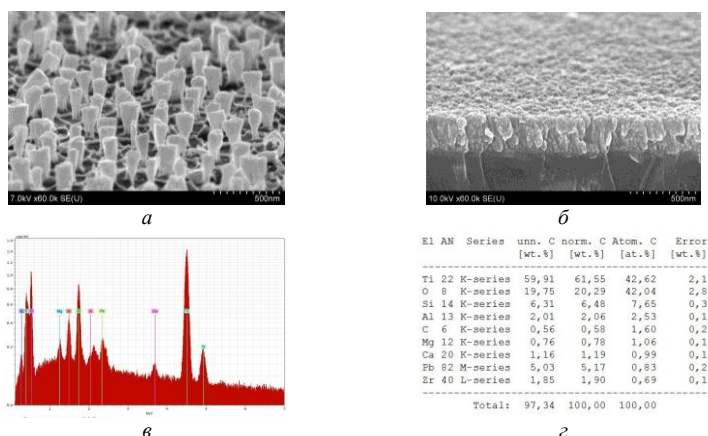


Рис. 1. Результаты исследований металлоксидных пленок системы Zr–Ti–Pb–O: СЭМ изображение матрицы титановых столбиков (а), СЭМ изображение пленка сформированного композита (б), EDX-спектр (в), элементный состав (г)

Полученный композит обладал зернистой структурой с диаметром зерна около 20 нм (рис. 1б). Атомарное соотношение Zr, Ti, Pb и O с учетом всех элементов, входящих в состав пленок, составило 1,85 % Zr, 59,91% Ti,

### Литература

1. Olorunfemi, Tope R., Nnamdi I. Nwulu, and Sikiru O. Ismail, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-20, (2022).
2. Gorokh G., et al., *Sensors* 22(10), 3640. (2022).
3. Gorokh G., et al., *Next Nanotechnology*. 5(11):100038. (2024).
4. Gorokh G., et al., *Sensors*, 21(12), 4169. (2021).

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

– А –

Аверьянов Д.В., 131, 133, 151, 153  
Акмалов А.Э., 87  
Алимов И.Е., 183  
Андреева М.Ю., 119  
Андрусов Ю.Б., 119  
Антонова В.Е., 119  
Анфертьев В.А., 65  
Аржанников А.В., 83, 85  
Атрашков А.С., 123

– Б –

Баглов А.В., 109, 141, 143, 145  
Байдусь Н.В., 27  
Бак П.А., 85  
Бауетдинов Ю.А., 171  
Бекреева Д.В., 53  
Березницкий И.В., 169  
Бобров А.И., 21, 23, 25, 27, 29  
Богданов С.А., 13  
Борисенко Д.П., 161, 163  
Будник В.С., 147  
Букин В.В., 79  
Бурдыкин М.С., 157  
Буркитбаев Д., 33  
Бухаров Д.Г., 175  
Бухтияров А.А., 159

– В –

Вакс В.Л., 65  
Валуев В.В., 31, 33  
Васильевский И.С., 19, 35, 37, 49, 77,  
131, 135, 137, 157, 183  
Вдовин В.И., 111  
Вергелес С.С., 159

Виниченко А.Н., 19, 37, 77, 131, 135,  
137  
Волков П.В., 25  
Володин В.А., 111  
Вязанкин О.С., 25

– Г –

Гавриленко Д.В., 81  
Гаврилова Т.А., 111  
Гаврус И.В., 115  
Гайдук П.И., 97  
Галиев Г.Б., 77  
Галиев Р.Р., 75  
Гарабов Д.В., 75  
Гарнов С.В., 79  
Гимальдинова М.А., 105  
Гинзбург Н.С., 85  
Гладышева К.А., 119, 121  
Гончаров А.Е., 121  
Гончаров Ю.Г., 69  
Горох Г.Г., 185  
Горшков А.П., 23, 25, 27, 29  
Горшкова Н.М., 59  
Грекова А.А., 128, 173  
Гришаков К.С., 33, 35  
Гришечкин М.Б., 119  
Гуминов Н.В., 51  
Гусев А.С., 159, 161, 165  
Гутаковский А.К., 111

– Д –

Данильчик А.В., 95  
Данилюк А.Л., 93  
Дезицкий О.В., 113  
Дейнеко С.С., 41  
Демидов В.М., 175  
Денисов И.А., 119

Дианов С.В., 39, 117  
Долматов Т.В., 79  
Домрачева Е.Г., 65  
Дриневский А.С., 101  
Дронина Е.А., 93, 95, 97  
Дыдышко Д.И., 145

– Е –

Евсейчик М.А., 141  
Егоркин В.И., 51  
Езубченко И.С., 129  
Ерошенков В.В., 123

– Ж –

Жариков А.М., 165  
Жмудь Б.А., 67  
Журавлёв К.С., 51, 111

– З –

Загороднев И.В., 15  
Зайцев К.И., 69  
Залялов Т.М., 53  
Занавескин М.Л., 61, 129  
Зелковский Е.А., 101  
Земляков В.Е., 51  
Зубков Л.С., 181

– К –

Калинин П.В., 83  
Капошин М.М., 159, 165  
Каргин Н.И., 19, 31, 33, 41, 47, 49,  
63, 77, 101, 135, 137, 157, 159, 165  
Карпилова Е.С., 101  
Карпов С.Н., 13  
Катин К.П., 106, 161, 163, 169, 173,  
181  
Килин С.Я., 165

Клековкин А.В., 123  
Клементьев Д.С., 23, 25  
Климов Е.А., 71, 77, 127  
Клоков А.Ю., 155  
Клоков В.А., 47, 49, 63  
Клочков А.Н., 19, 37, 71, 77, 135, 137,  
157

Ковалева П.М., 77  
Ковальчук Н.Г., 93, 95, 97, 149  
Ковин Я.А., 123  
Козлов Р.Ю., 123, 139  
Колобкова Е.М., 129  
Колосовский Д.А., 53  
Комаровский Н.Ю., 123  
Кондратенко А.В., 57  
Кондратьев О.А., 131, 133, 153  
Королев Н.А., 179  
Королик О.В., 109  
Косякова А.М., 119, 121, 123  
Котекин Р.А., 13  
Котковский Г.Е., 87  
Кривобок В.С., 123  
Кузищин Ю.А., 87  
Кузнецов К.А., 77  
Кузнецов С.А., 83  
Кукин Н.С., 159  
Кулагин В.В., 31, 33  
Кулаковская Т.В., 121  
Кулиш А.М., 57  
Кулямин П.А., 107, 167  
Кунцевич А.Ю., 155  
Кушнир В.Н., 91

– Л –

Лабунцов В.А., 101, 147  
Лаврухин Д.В., 69, 71  
Лаврухина Е.А., 21  
Ладугин М.А., 73  
Ларионов К.В., 133  
Лемешевская Г.А., 23, 25

Литвинов А.В., 175  
Логанчук С.М., 115  
Логачев П.В., 85  
Лосев В.В., 57  
Лошкарёв И.Д., 111  
Лукьяненко Д.В., 43  
Лунин Л.С., 113  
Луценко Е.В., 95

– М –

Маврешко Е.И., 39, 117  
Майдебуря Я.Е., 111  
Макаров М.А., 83  
Малехонова Н.В., 23, 25, 27  
Малин Т.В., 51, 111  
Мальгин В.А., 121  
Мамаева К.А., 79  
Маматкулов Ш.И., 141  
Мансуров В.Г., 51, 111  
Маргушин Р.Е., 159  
Мартынов И.Л., 87  
Маслов М.М., 105, 169, 173, 181  
Мельников Д.В., 59  
Меринов В.Б., 107  
Мещеряков И.Н., 85  
Мигас Д.Б., 89  
Милахин Д.С., 51, 111  
Минаев И.И., 123  
Минин И.В., 45  
Минин О.В., 45  
Молодцова Е.В., 123, 139  
Морозов А.А., 53  
Музыкаина Е.А., 17

– Н –

Неволина Т.Н., 49  
Нежданов А.В., 21, 23, 25, 29  
Некрасов П.В., 183  
Нестюркин М.С., 123, 139

Низовцев А.П., 165  
Никитенко В.Р., 177, 179  
Никифоров Д.А., 85  
Николаев Д.Д., 137  
Номоев С.А., 37, 157

– О –

Облов К.Ю., 175  
Осинных И.В., 111  
Осипов Е.В., 87

– П –

Павлов А.Ю., 71  
Павлов П.В., 123, 139  
Павлова О.С., 123, 139  
Павлюченко В.А., 85  
Панфилов А.С., 27, 29  
Парфёнов О.Е., 131, 133, 151, 153  
Пашковский А.Б., 13  
Пащенко А.С., 113  
Певцов И.Д., 175  
Песков Н.Ю., 85  
Петрошенко И.А., 47  
Печерская М.Д., 141  
Плеханов А.А., 87  
Пономарёв Д.С., 69, 75  
Понамарёв С.А., 53, 111  
Полов В.П., 115  
Прищепина С.Л., 91, 93, 95, 97, 149  
Прокопьева Л.С., 77  
Пушкарёв С.С., 71

– Р –

Радюк Д.В., 101  
Родионов Д.А., 15  
Романов С.А., 79  
Рудый А.В., 39, 117  
Рыбин М.Г., 161, 163

Рыжук Р.В., 31, 33, 49, 165  
Рындя С.М., 41, 43, 135

– С –

Салказанов А.Т., 159, 165  
Самотаев Н.Н., 175  
Самцов Д.А., 83, 85  
Сандалов Е.С., 83, 85  
Саури А.Д., 63, 165  
Сафронов И.В., 89  
Середин Б.М., 116  
Сибирмовский Ю.Д., 17  
Сигловая Н.В., 41  
Сидоренко К.В., 21, 23, 25, 27, 29  
Синицкий С.Л., 83, 85  
Синько А.С., 71  
Сковородин Д.И., 85  
Скрылев А.А., 23, 25  
Соболев А.С., 67  
Соколов И.С., 131, 133, 151, 153  
Солянкин П.М., 71  
Сорвачев П.С., 57  
Сорокин П.Б., 133  
Спектор И.Е., 69  
Старинский С.В., 53  
Степанов В.Д., 83  
Сторчак В.Г., 131, 133, 151, 153  
Султанов А.О., 41  
Суханова А.С., 127  
Сычев А.А., 47

– Т –

Талденков А.Н., 131, 133, 151, 153  
Тараканов Е.Д., 117  
Тертышная Ю.А., 157  
Тищенко А.А., 81  
Токмачёв А.М., 131, 133, 151, 153  
Топиков Д.В., 121  
Торопин А.В., 177

Торхов Н.А., 55, 99  
Третьяков Я.С., 135  
Трофимов А.А., 120, 121, 123, 139  
Тучковский А.К., 147

– У –

Улькаров В.А., 123  
Ульянов Я.В., 39, 117  
Ушаков А.А., 79

– Ф –

Федосенко В.С., 185  
Филиппов В.В., 147  
Филонов А.Б., 89  
Фролов Н.Ю., 155

– Х –

Хабибуллин Р.А., 67, 73  
Хазанова С.В., 27, 29  
Хомец А.Л., 89  
Хомицкий Д.В., 21  
Хорошко Л.С., 109, 141, 143, 145

– Ц –

Царегородцев Д.О., 119  
Цуканова Е.Е., 47  
Цунваза Д., 49

– Ч –

Черепенин В.А., 31  
Черняева М.Б., 65  
Чешев Е.А., 39  
Чижов П.А., 79  
Чистяков А.А., 87

– Ш –

Шакиров В.А., 103  
Шарков А.И., 155  
Шахматов В.С., 103  
Шевлюга В.М., 79  
Штрайх Р.С., 73  
Шухов Ю.Г., 53

– Щ –

Щеников Н.В., 139  
Щербakov Л.А., 19

– Э –

Эм М., 185  
Этрекова М.О., 175

– Я –

Якимчук Д.В., 141  
Яковенко А.А., 115  
Янушкевич В.В., 185  
Яценко А.Н., 115  
Яцков Я.Р., 103  
Ячменев А.Э., 69



# МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

15-я Международная  
научно-практическая конференция  
по физике и технологии  
наногетероструктурной СВЧ-электроники

СБОРНИК ТРУДОВ

Подписано в печать 06.05.2024. Формат 60×84 1/16.  
Печ.л. 12,0. Тираж 100 экз. Заказ № 15.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Типография НИЯУ МИФИ.  
115409, Москва, Каширское ш., 31*