

**РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО АКТУАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ФОТОЭЛЕКТРОНИКИ**

(с участием иностранных ученых)

# **ФОТОНИКА - 2015**

12-16 ОКТЯБРЯ 2015 г.

## **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**НОВОСИБИРСК**



## Организатор:



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ  
им. А.В. Ржанова СО РАН г. Новосибирск

## Конференция проводится при содействии:



Сибирское отделение РАН



Федеральное агентство научных организаций  
Российской Федерации



АО «Швабе»



ОАО «Российская электроника»

Новосибирский государственный университет

## Финансовая поддержка

Организаторы глубоко признательны за поддержку конференции



Федеральное агентство научных организаций  
Российской Федерации



Российский фонд фундаментальных исследований



Группа компаний «Научное оборудование»



ООО «Вакуумные системы и электроника»



ЗАО «Интек Аналитика»

Сайт конференции: <http://www.isp.nsc.ru/photronics2015>

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

### Сопредседатели:

Латышев А.В. ИФП СО РАН, Новосибирск  
Асеев А.Л. СО РАН, Новосибирск  
Максин С.В. АО "Швабе", Екатеринбург

### Зам. председателя:

Двуреченский А.В. ИФП СО РАН, Новосибирск  
Ракович Н.С. АО "Швабе", Екатеринбург

### Ученый секретарь

Каламейцев А.В. ИФП СО РАН, Новосибирск

### Члены комитета:

Алферов Ж.И. СПб АУ НОЦНТ РАН, Санкт-Петербург  
Белоусов Ю.И. ОАО "Корпорация "Комета", Москва  
Бетелин В.Б. НИИСИ РАН, Москва  
Бочкарёв О.И. ВПК, Москва  
Брыкин А.В. ОАО "Российская электроника", Москва  
Волков Н.В. ИФ СО РАН, Красноярск  
Гуляев Ю.В. ИРЭ РАН, Москва  
Доценко В.В. АО "НПФ "Микран", Томск  
Жуков А.Е. СПб АУ НОЦНТ РАН, Санкт-Петербург  
Зверев А.В. ОАО "Российская электроника", Москва  
Иванов В.П. ФГУП "НПО "ГИПО", Казань  
Ивченко Е.Л. ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Исюк В.И. ОАО НЗПП с ОКБ, Новосибирск  
Крайлюк А.Д. АО "Концерн "Вега", Москва  
Красильник З.Ф. ИФМ РАН, Н.Новгород  
Красников Г.Я. ОАО "НИИМЭ и Микрон", Зеленоград  
Кукушкин И.В. ИФТТ РАН, Черногоровка  
Кулипанов Г.Н. ИЯФ СО РАН, Новосибирск  
Мантуров Д.В. Минпромторг, Москва  
Мизеров М.Н. НТЦ МЭ РАН, Санкт-Петербург  
Мисник В.П. ОАО "Корпорация "Комета", Москва  
Неизвестный И.Г. ИФП СО РАН, Новосибирск  
Никитов С.А. ИРЭ РАН, Москва  
Овсюк В.Н. ИФП СО РАН, Новосибирск  
Орликовский А.А. ФТИ РАН, Москва  
Пархоменко Ю.Н. АО "ГИРЕДМЕТ", Москва  
Резнев А.А. Москва  
Потапов А.В. Минпромторг, Москва  
Салихов С.В. Минобрнауки, Москва  
Сауров А.Н. ИНМЭ РАН, Москва  
Сибельдин Н.Н. ФИ РАН, Москва  
Сигов А.С. МИРЭА, Москва  
Сизов Ф.Ф. ИФП НАН Украины, Киев  
Солдатенков В.А. ОАО "НПО Геофизика-НВ", Москва  
Тарасов А.П. ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева",  
Красногорск  
Тарасов В.В. ОАО ЦНИИ "Циклон", Москва

Котюков М.М.	ФАНО России, Москва
Локтионов В.И.	ОАО "Катод", Новосибирск
Максимов Е.М.	Москва
Паулиш А.Г.	Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ", Новосибирск
Пономаренко В.П.	АО "НПО "Орион", Москва
Потатуркин О.И.	ИАиЭ СО РАН, Новосибирск
Принц В.Я.	ИФП СО РАН, Новосибирск
Пчеляков О.П.	ИФП СО РАН, Новосибирск
Рассохин В.А.	ОАО "Швабе Оборона и Защита", Новосибирск
Рубцова Н.Н.	ИФП СО РАН, Новосибирск
Сидоров Ю.Г.	ИФП СО РАН, Новосибирск
Рябцев И.И.	ИФП СО РАН, Новосибирск
Скубневский Э.В.	ИФП СО РАН, Новосибирск
Торопов А.И.	ИФП СО РАН, Новосибирск
Федорук М.П.	НГУ, Новосибирск
Шлишевский В.Б.	СГУГиТ, Новосибирск
Якушев М.В.	ИФП СО РАН, Новосибирск
Филачев А.М.	ГУП "НПО "Орион", Москва
Хохлов Д.Р.	МГУ, Москва
Хохлов С.В.	Минпромторг, Москва
Чаплик А.В.	ИФП СО РАН, Новосибирск
Шалагин А.М.	ИАиЭ СО РАН, Новосибирск

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

### **Председатель**

Двуреченский А.В.

ИФП СО РАН, Новосибирск

### **Зам. председателя:**

Грибков В.П.

ИФП СО РАН, Новосибирск

Дворецкий С.А.

ИФП СО РАН, Новосибирск

Федоринин В.Н.

Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ",  
Новосибирск

### **Ученый секретарь**

Ильина Л.А.

ИФП СО РАН, Новосибирск

### **Члены оргкомитета:**

Бетеров И.И.

ИФП СО РАН, Новосибирск

Войцеховский А.В.

ТГУ, Томск

Гайслер В.А.

НГТУ, Новосибирск

Глухов А.В.

ОАО НЗПП с ОКБ, Новосибирск

Гугучкин В.И.

ЗАО "Экран-Оптические системы",  
Новосибирск

Девяткин П.Т.

ИФП СО РАН, Новосибирск

Ивонин И.В.

ТГУ, Томск

Паршин А.С.

СибГАУ, Красноярск

Ковчавцев А.П.

ИФП СО РАН, Новосибирск

Корчак В.Ю.

Секция прикладных проблем при Президиуме РАН,  
Москва

Котюков М.М.

ФАНО России, Москва

Локтионов В.И.

ОАО "Катод", Новосибирск

Максимов Е.М.  
Паулиш А.Г.  
Пономаренко В.П.  
Потатуркин О.И.  
Принц В.Я.  
Пчеляков О.П.  
Рассохин В.А.  
Рубцова Н.Н.  
Сидоров Ю.Г.  
Рябцев И.И.  
Скубневский Э.В.  
Торопов А.И.  
Федорук М.П.  
Шлишевский В.Б.  
Якушев М.В.

Москва  
Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ", Новосибирск  
АО "НПО "Орион", Москва  
ИАиЭ СО РАН, Новосибирск  
ИФП СО РАН, Новосибирск  
ИФП СО РАН, Новосибирск  
ОАО "Швабе Оборона и Защита", Новосибирск  
ИФП СО РАН, Новосибирск  
НГУ, Новосибирск  
СГУГиТ, Новосибирск  
ИФП СО РАН, Новосибирск

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>И.Д. Бурлаков, В.П. Пономаренко, А.М. Филачев</i> Космическая фотосенсорика . . . . .	19
<b>Г.Н. Кулипанов</b> Потенциальные возможности Новосибирского лазера на свободных электронах для исследований в области длин волн (270 – 5) микрон . . . . .	20
<b>Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.А. Кучмижак</b> Лазерная нанолитография . . . . .	21
<i>Д.В. Брунев, В.В. Васильев, В.С. Варавин, А.В. Вишняков, С.А. Дворецкий, И.В. Марчишин, Н.Н. Михайлов, И.В. Сабина, Г.Ю. Сидоров, Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев, А.В. Латышев</i> Фотоприемные устройства на основе гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия и ртути . . . . .	22
<b>А.Е. Жуков, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.В. Крыжановская, Ф.И. Зубов, А.С. Паюсов, Ю.В. Кудашова, Е.С. Семенова, Л.В. Асрян</b> Асимметричные барьерные слои и их применение в полупроводниковых лазерах . . . . .	23
<b>В.М. Устинов</b> Быстродействующие вертикально-излучающие лазеры . . . . .	24
<i>А.А. Андронов, Е.П. Додин, Ю.Н. Ноздрин, Д.И. Зинченко, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, В.А. Беляков, И.В. Ладенков, А.Г. Фефелов</i> Стимулированное излучение на переходах между лестницами Ванье-Штарка в полупроводниковых сверхрешетках . . . . .	25
<b>С.В. Гапоненко</b> Перспективы коллоидной оптоэлектроники . . . . .	26
<b>Б.И. Шапиро</b> Высокоорганизованные J-агрегаты полиметиновых красителей как сенсоры в фотоэлектронике . . . . .	27
<b>В.В. Шелковников, Н.А. Орлова, И.Ю. Каргаполова</b> Синтез функциональных блоков для нелинейно-оптических хромофоров . . . . .	28
<b>В.С. Павельев, А.Н. Агафонов, Н.А. Винокуров, Б.О. Володкин, Б.А. Князев, Г.Н. Кулипанов, В.А. Сойфер, К.Н. Тукмаков, Ю.Ю. Чопорова</b> Формирование лазерных пучков терагерцового диапазона на основе применения дифракционной компьютерной оптики . . . . .	29
<b>W. Knap, D. But, N. Dyakonova, D. Coquillat, M. Vitiello S. D. Ganichev, M. Sypek</b> Terahertz Detectors Based on Plasma Oscillations in Nanometer Field Effect Transistors . . . . .	30
<i>А.Д. Буравлев, И.А. Мустафин, В.Н. Трухин, Г.Э. Цырлин, J.P. Kakko, T. Huhtio, H. Lipsanen</i> Эффективная генерация терагерцового излучения в периодическом массиве полупроводниковых нитевидных нанокристаллах на основе GaAs . . . . .	31
<i>С.А. Кузнецов, А.Г. Паулиш, В.Н. Федоринин</i> Оптоэлектронные системы терагерцового и субтерагерцового диапазонов частот электромагнитного излучения . . . . .	32
<b>А.Э. Климов, В.В. Кубарев, В.Н. Шумский</b> Уровни захвата и терагерцовые фотоэффекты в PbSnTe:In . . . . .	33

<i>С.Г.Егорова, А.В.Галеева, В.И.Черничкин, Л.И.Рябова, Е.П.Скипетров, М.Е.Тамм, Л.В.Яшина, С.Н.Данилов, С.Д.Ганичев, Д.Р.Хохлов</i>	
Терагерцовое зондирование поверхностных состояний в топологических изоляторах . . . . .	34
<b>К.Д. Мынбаев, Н.Л. Баженов, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, В.С. Варавин, С.А. Дворецкий</b>	
Фотолюминесцентная характеристика эпитаксиальных слоев твердых растворов CdHgTe . . . . .	35
<b>В.А. Володин, М.П. Гамбарян, Г.К. Кривякин, Г.Н. Камаев, С.А. Кочубей, А.Г. Черков, В.И. Вдовин, М. Vergnat, J. Stuchlik, А.В. Дзуреченский</b>	
Светоизлучающие нанокристаллы Si, Ge и GeSi в различных матрицах: формирование, структурные и оптические свойства . . . . .	36
<b>А.А. Блошкин, А.И. Якимов, В.В. Кириенко, В.А. Тимофеев, В.А. Армбристер, А.В. Дзуреченский, А.И. Никифоров</b>	
Гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками Ge для фотоприемников среднего ИК-диапазона . . . . .	37
<b>А.Е.Гайдук, С.Н.Речкунов, В.А.Селезнёв, Е.А.Злобина, В.Я.Принц</b>	
Многослойные поляризаторы ИК-диапазона большой площади . . . . .	38
<b>А.В. Войцеховский, Н.Х. Талипов</b>	
Воздействие мощного импульсного ИК излучения на свойства гетероэпитаксиальных структур HgCdTe . . . . .	39
<b>Е.А. Емельянов, А.В. Васев, М.А. Пулято, И.Б. Чистохин, В.В. Румянцев, С.В. Морозов, Б.Р. Семягин, А.П. Василенко, А.К. Гутаковский, В.В. Преображенский</b>	
Влияние температуры роста на структурные и оптические свойства сверхрешеток GaSb/InAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. . . . .	40
<b>Л.К. Орлов, Н.С. Волкова, М.Л. Орлов, Т.О. Мищенко</b>	
Туннельная спектроскопия электронных состояний в гетерокомпозициях InAs/GaAs с массивами квантовых точек . . . . .	41
<b>И.И. Ижнин, Е.И. Фищич, А. В. Войцеховский, А.Г. Кортаев, А.Ю. Бончик, Г.В. Савицкий, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, К.Д. Мынбаев</b>	
Релаксация и долговременная стабильность МЛЭ CdHgTe $n^+n$ -структур, сформированных ионным травлением . . . . .	42
<b>И.Е. Тыщенко, Л.Л. Дзюбина, А.Г. Черков, В.А. Володин, В. П. Попов</b>	
Ионно-лучевой синтез и свойства нанокристаллов InSb в структурах кремний-на-изоляторе. . . . .	43
<b>В.А. Швец, Е.В. Спесивцев, И.А. Азаров, С.В. Рыхлицкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, В.Д. Кузьмин, Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий</b>	
Метод эллипсометрии в технологии процессов молекулярно-лучевой эпитаксии кадмий-ртуть-теллура . . . . .	44
<b>Ю.Г.Сидоров, В.С.Варавин, Е.М.Труханов, И.В.Сабина, И.Д.Лошкарев, А.В.Колесников, М.В.Якушев</b>	
Дислокации в гетероэпитаксиальных структурах CdHgTe на подложках ориентации (013) и возможности снижения их плотности . . . . .	45
<b>A.Piotrowski</b>	
Status of mid and long infrared detectors at Vigo System . . . . .	46
<b>И.Д. Бурлаков, К.О. Болтарь, П.В. Власов, А.А. Лопухин, В.А. Соловьев, А.Н. Семенов, Б.Я. Мельцер, Т.А. Комиссарова, Т.В. Львова, С.В. Иванов</b>	
МФПУ на основе эпитаксиальных структур антимонида индия . . . . .	47

<i>Д.Г. Есаев, А.П. Савченко, В.А. Фатеев, И.В. Марчишин, М.А. Демьяненко, А.И. Торопов, А.К. Калагин, Н.А. Валишева, Н.Р. Вицина</i> Матричные фотоприемники на основе квантовых ям GaAs/AlGaAs форматом 384×288 и 640×512 .....	48
<i>В.М.Базовкин, Н.А.Валишева, В.С.Варавин, В.В.Васильев, В.М. Гайлес, А.А.Гузев, С.А.Дворецкий, А.П.Ковчавцев, И.И.Ли, Д.В.Марин, Ю.С.Макаров, В.Г.Половинкин, И.В.Сабина, Ю.Г.Сидоров, Г.Ю.Сидоров, Д.В.Фромичев, А.В.Царенко, М.В.Якушев</i> Новое поколение ИК фотоприемников на основе КРТ, работающих при повышенных температурах .....	49
<i>Г.Ю. Сидоров, И.В. Сабина, В.В. Васильев, Ю.Г. Сидоров, И.В. Марчишин, А.В. Предеин, М.В. Якушев, В.М. Базовкин, В.Г. Половинкин</i> Создание матричных фотоприемников на основе ГЭС КРТ МЛЭ на длины волн 3-5 и 8-10 мкм форматом до 1024×1024 .....	50
<i>О.И. Semenova, N.A.Yeryukov, Zhiyong Li</i> Thin films of PECVD silicon nitride for nanophotonic application .....	51
<b>Ю.Н. Вольхин</b> Радиофотоника: прошлое, настоящее, будущее .....	52
<i>С.А. Малышев, А.Л. Чиж, К.Б. Микитчук, А.А. Тептеев, А.С. Шуленков</i> Мощный высокоскоростной фотодиод Шоттки для устройств и систем радиофотоники ...	53
<b>А.И. Плеханов</b> Высокоскоростные оптические модуляторы на основе нелинейно-оптических полимеров .	54
<i>И.М. Гаджиев, М.С. Буяло, Е.Л. Портной</i> Увеличение мощности модуляции добротности в лазерах с квантовыми ямами под воздействием эффекта Штарка .....	55
<i>М.Г. Кистенева, М.В. Бородин, В.В. Щербина, С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.С. Акрестина, Е.С. Худякова, В.М. Лисицын, С.А. Степанов, А.А. Колегов</i> Волноводные и оптические характеристики эпитаксиальных структур GaN/InGaN – сапфир.	56
<i>М.Д. Шарков, М.Е. Бойко, А.В. Бобыль, А.М. Бойко, Е.М. Еришенко, Я.В. Зубавичус, С.Г. Конников</i> Изучение структуры и фазового состава синтезированных образцов фосфата лития-железа и титаната лития – материалов для литий-ионных аккумуляторов .....	57
<b>В.И. Гавриленко</b> Лазеры дальнего ИК диапазона на основе узкозонных полупроводников и гетероструктур с квантовыми ямами .....	58
<b>В.А. Гайслер</b> Разработка неклассических излучателей на основе полупроводниковых квантовых точек . .	59
<i>Н.В. Крыжановская, Ю.В. Кудашова, Э.И. Моисеев, А.Е. Жуков, М.В. Максимов, М.М. Кулагина, С.И.Трошков, Ю.М.Задиранов, А.А. Липовский</i> Инжекционные микродискковые лазеры с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs, работающие до 100°C .....	60
<i>А.В. Шевлягин, Н.Г. Галкин, А.К. Гутаковский, Т.С. Шамирзаев</i> Высокоэффективный Si ИК светодиод со встроенными нанокристаллитами $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> , работающий при комнатной температуре .....	61

<b>С.В. Морозов, В.В. Румянцев, А.А. Дубинов, В.Я. Алёшкин, А.М. Кадыков, М.А. Фадеев, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, В.И. Гавриленко</b> Длинноволновая фотолюминесценция и стимулированное излучение в структурах на основе твердых растворов HgCdTe .....	62
<b>О.Е. Терещенко, В.А. Голяшов, И.Б. Чистохин, Т.С. Шамирзаев, А.С. Ярошевич, А.А. Родионов, И.А. Дербезов, В.А. Гайслер, А.К. Бакаров, Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, И.И. Мараховка, А.В. Коптилов, Н.В. Кислых</b> Изучение инъекции спин-поляризованных электронов в гетероструктуры $A^3B^5$ методом поляризованной катодолюминесценции .....	63
<b>Л.Н. Сафронов, В.А. Антонов, С.Н. Подлесный, В.П. Попов</b> Управление спектром излучения алмазов с NV центрами .....	64
<b>А.А. Лямкина, С.П. Мощенко, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, К. Шрамль, М. Канибер, Д. Финли</b> Экситон-плазмонное взаимодействие в системе с InAs/AlGaAs КТ и литографическими анизотропными наноантеннами .....	65
<b>Д.С. Абрамкин, К.М. Румынин, А.К. Бакаров, А.К. Гутаковский, О.В. Кибис, Т.С. Шамирзаев</b> Кристаллическое строение и энергетический спектр III-Sb/AlAs самоорганизованных квантовых точек .....	66
<b>Г.М. Борисов, В.Г. Гольдорт, Д.В. Ледовских, А. А. Ковалёв, М.Н. Пулято, В.В. Преображенский, Н.Н. Рубцова, Б. Р. Семягин, В.Е. Кисель, А.С. Руденков, Н.В. Кулешов, А.А. Павлюк</b> Полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглощением для фемтосекундных лазеров ближнего инфракрасного диапазона .....	67
<b>А.В. Царев</b> Интерферометр Маха-Цендера, слабо чувствительный к технологическим ошибкам изготовления .....	68
<b>С.Г. Тиходеев</b> Оптические свойства кирально-модулированных фотонных структур .....	69
<b>Н.В. Волков, А.С. Тарасов, М.В. Рауцкий, А.В. Лукьяненко, С.Н. Варнаков, С.Г. Овчинников</b> Эффекты гигантского магнитосопротивления в гибридных структурах ферромагнетик/полупроводник, индуцированные оптическим излучением .....	70
<b>А.Г. Милёхин, Л.Л. Свешникова, Т.А. Дуда, Е.Е. Родякина, С.А. Кузнецов, V.M. Dzhanan, А.В. Латышев, D.R.T. Zahn</b> Комбинационное рассеяние света и инфракрасное поглощение полупроводниковыми нанокристаллами на плазмонных структурах .....	71
<b>А.Г. Журавлев, А.С. Романов, В.Л. Альперович</b> Эмиссия горячих и термализованных фотоэлектронов из $p$ -GaAs(Cs,O) с положительным и отрицательным средством .....	72
<b>А.В. Трифанов, Д.Ю. Протасов, В.Я. Костюченко, С.А. Дворецкий</b> Определение подвижности неосновных электронов в $p$ - $Cd_{0.22}Hg_{0.78}Te$ при температуре жидкого азота .....	73
<b>А.А. Гисматулин, В.А. Володин, Г.Н. Камаев, С.Г. Черкова, А.Г. Черков</b> Формирование и оптические свойства многослойных наноструктур $Si/SiO_2$ .....	74

<i>О.П. Пчеляков, В.В. Преображенский, М.А. Путьато, А.С. Дерябин, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.К. Гутаковский, Е.М. Труханов, Н.А. Паханов, А.П. Василенко, И.Д. Лошкарёв, Д.И. Феклин, В.М. Владимиров, А.С. Паришин</i> Проблемы создания высокоэффективных солнечных преобразователей для космических аппаратов . . . . .	75
<i>Н.Г. Галкин, К.Н. Галкин, И.М. Чернев, А.В. Шевлягин, Radek Fajgar, The Ha Stuchlikova, Jiri Stuchlik, Zdenek Remes</i> Новый подход к формированию солнечных батарей на основе аморфного гидрогенизированного кремния и полупроводниковых силицидов . . . . .	76
<i>П.Н. Брунков, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Н.Г. Карпухина, А.А. Лавров, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова</i> Фотодиоды на основе ДГС InAs/InAsSb <sub>0,1</sub> /InAsSbP ( $\lambda_{0,1}=5.2$ мкм), работающие в температурном диапазоне 50-300 К . . . . .	77
<i>А.Н. Бельтюков, Р.Г. Валеев, А.И. Чукавин, Д.И. Петухов, В.М. Ветошкин</i> Разработка электролюминесцентных излучателей оптического диапазона на базе полупроводниковых наноконпозитов ZnS:Cu@Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	78
<i>А.П. Ковчавцев, В.Г. Кеслер, А.А. Гузев, А.Е. Настовьяк, А.В. Царенко, З.В. Панова</i> Температурные зависимости адмиттанса InAs-МОП структур со сверхтонким окислом . . . . .	79
<i>В.В.Карпов, А.В.Филатов, Е.В.Сусов, Н.С.Кузнецов</i> Фоторезисторы из гетероэпитаксиальных структур CdHgTe на спектральный диапазон 8-12 мкм . . . . .	80
<i>Б.А. Князев, В.В. Герасимов, М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, И.В. Марчишин, А.А. Никитин, Ю.Ю. Чопорова</i> Матричные болометрические приемники в исследованиях на терагерцовом лазере на свободных электронах . . . . .	81
<i>Д.В.Бородин, Ю.В.Осипов, В.В.Васильев</i> КМОП фотоприемник видимого диапазона формата 1,3 Мп . . . . .	82
<i>Г.Е. Журов, Е.А. Крапивко, И.И. Кремис, В.Н. Федоринин, М.Ю. Цивинский, С.М. Чурилов, П.И. Шапор, К.П. Шатунов</i> Состояние развития тепловизионных модулей и приборов в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» . . . . .	83
<i>В.В. Карпов, В.П. Астахов, М.Е. Козырев, В.Ф. Чишко, В.И. Петренко, В.И. Семенов, Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов, В.В. Васильев</i> Спектральные характеристики фотодиодов КМОП матричного фотоприемника видимого диапазона формата 256x256 элементов . . . . .	84
<i>А.А. Емельянов, А.Г. Викулов, С.В. Гамзинов, А.В. Долгих, И.И. Гольдберг, В.И. Локтионов, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, А.Ю. Андреев, А.В. Мазалов, В.В. Бакин, Д.В. Горихов, С.Н. Косолобов, С.А. Рожков, Г.Э. Шайблер, А.С. Терехов</i> Фотоприёмники с полупроводниковыми ОЭС – фотокатодами на спектральные диапазоны в интервале 200 - 1100 нм . . . . .	85
<i>С.М. Борзов, А.В. Голицын, Б.С. Долговесов, О.И. Потатуркин, М.Н. Филиппов</i> Информационное обеспечение систем наблюдения распределенных роботизированных комплексов . . . . .	86
<i>А.И. Чукавин, Р.Г. Валеев, А.Н. Бельтюков, В.В. Кривенцов, А.Л. Тригуб</i> Исследование влияния локальной атомной и электронной структуры наноконпозитов ZnS:Cu@Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> на их фотоэлектрические свойства . . . . .	87

<b>А.В. Аржанников, И.А. Иванов, С.А. Кузнецов, В.Ф. Склеров</b> Частотно-селективная диагностическая система для абсолютных измерений электромагнитного излучения в интервале от миллиметровых волн до терагерцового излучения . . . . .	88
<b>Э.Г. Косцов, С.Д. Иванов</b> Элемент неохлаждаемой мегапиксельной тепловизионной матрицы на основе тонких пироэлектрических пленок . . . . .	89
<b>А.В. Голицын</b> Электроуправляемый широкоспектральный объектив с жидкостными линзами . . . . .	90
<b>С.В. Рыхлицкий, Е.В. Спесивцев, В.А. Швец, О.П. Пчеляков, Л.В. Соколов, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов</b> Методы и средства эллипсометрической диагностики материалов и структур нанофотоэлектроники . . . . .	91
<b>Е.А. Емельянов, А.В. Васев, Б.Р. Семягин, А.П. Василенко, А.А. Команов, А.К. Гутаковский, М.А. Путьато, В.В. Преображенский</b> Получение гетероструктур InAsSb методом МЛЭ с применением различных молекулярных форм As . . . . .	92
<b>А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, Т.А. Левцова, Н.А. Валишева, А.С. Кожухов, Д.В. Щеглов</b> ДБЭО исследования начальных стадий роста слоев InSb при МЛЭ . . . . .	93
<b>М.А. Василенко, И.Г. Неизвестный, Н.Л. Шварц</b> Условия формирования нанокристаллов и наноколец GaAs методом капельной эпитаксии (Монте-Карло моделирование) . . . . .	94
<b>А.Е. Гайдук, С.Н. Речкунов, В.А. Селезнёв, В.Я. Принц</b> Нанорешеточный световой фильтр большой площади, изготовленный с помощью наноимпринт-литографии . . . . .	95
<b>Д.В. Дмитриев, А.М. Гилинский, А.И. Торопов, К.С. Журавлёв</b> Синтез гетероструктур InAlAs согласованных с подложкой InP методом МЛЭ для высокочувствительных фотодиодов . . . . .	96
<b>А.Ю. Игуменов, А.С. Паршин, Ю.Л. Михлин, О.П. Пчеляков, В.С. Жигалов</b> Электронная спектроскопия дисилицида железа . . . . .	97
<b>В.А. Пилипович, В.Б. Залесский, А.И. Конойко, В.М. Кравченко</b> Термооптический преобразователь на базе микрорезонатора Фабри-Перо . . . . .	98
<b>А.В. Войцеховский, А.П. Коханенко, К.А. Лозовой</b> Зависимость критической толщины перехода по Странскому–Крастанову в системе $Ge_xSi_{1-x}/Si$ от температуры и состава . . . . .	99
<b>И.А. Милёхин, Е.Е. Родякина, А.В. Латышев, С.А. Кузнецов, Л.Л. Свешникова, А.Г. Милёхин</b> Локализованные поверхностные плазмоны в массивах наноантенн Au . . . . .	100
<b>С.В. Рыхлицкий, Е.В. Спесивцев, С.А. Дулин</b> Спектральный рефлектометрический комплекс для технологического контроля оптических материалов фотоники по параметру объёмного рассеяния . . . . .	101
<b>О.И. Подкопаев, Т.О. Павлюк, А.Ф. Шиманский, Н.О. Голубовская</b> Выращивание малодислокационных монокристаллов германия . . . . .	102
<b>В.А. Швец, В.Г. Ремесник, Н.Н. Михайлов, В.С. Варавин, П.Л. Смирнов, С.А. Дворецкий</b> Исследование оптическими методами слоёв КРТ, имплантированных ионами $B^+$ . . . . .	103

<b>А.В. Артамонов, В.П. Астахов, И.Б. Варлашов, В.В. Карпов, П.В. Митасов</b> Химический состав анодных окисных пленок InAs и электрофизические параметры МДП-структур на их основе . . . . .	104
<b>А.Х. Мухамметоразова</b> Электрические свойства наноструктурированных барьеров Шоттки Pt-окисел-n-GaAs . . . .	105
<b>К.А. Конфедератова, Е.Е. Родякина</b> Формирование однородных по размеру наноструктур методом электронно-лучевой литографии: методы коррекции эффектов близости . . . . .	106
<b>Н.Н. Михайлов, В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, В.Г. Ремесник, Ю.Г. Сидоров</b> Влияние защитного покрытия CdTe на электрофизические параметры эпитаксиальных пленок $Cd_xHg_{1-x}Te$ . . . . .	107
<b>А.Н. Акимов, Д.В. Иценко, Н.С. Пащин, С.П. Супрун, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский</b> Структуры n-i-n, p-i-p, n-i-p на основе эпитаксиальных плёнок PbSnTe:In: изготовление и свойства . . . . .	108
<b>П.С. Загубисало, А.Г. Паулиш, С.А. Кузнецов</b> Моделирование теплофизических процессов в конвертере субтерагерцового излучения в инфракрасное . . . . .	109
<b>А.Г. Паулиш, П.С. Загубисало</b> Оптимизация свойств фотоупругого элемента для пьезооптических датчиков деформаций .	110
<b>С.Л. Микерин, А.И. Плеханов, А.Э. Симанчук, А.В. Якиманский</b> Полингованные нелинейно-оптические полимеры для генерации широкополосного терагерцового излучения . . . . .	111
<b>М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, А.И. Козлов, А.Р. Новоселов, В.Н. Овсяк</b> Мозаичные инфракрасные и терагерцовые фотоприемники обзорно-панорамного формата: системный подход . . . . .	112
<b>А.А. Алтухов, Ю.В. Гуляев, Н.Х. Талипов, В.С. Фещенко, В.А. Шепелев, Г.В. Чучева</b> Комплексированный ИК+УФ интегральный матричный фотоприёмник на основе микроболометров и SiC . . . . .	113
<b>А.А. Алтухов, Ю.В. Гуляев, Н.Х. Талипов, Г.В. Чучева</b> Высококочувствительный планарный матричный фотоприемник на основе алмаза для УФ-канала комплексированной инфракрасной оптико-электронной системы . . . . .	114
<b>И.А. Азаров, В.А. Швец, Б.А. Князев, Ю.Ю. Чопорова, С.В. Рыхлицкий, В.Ю. Прокопьев</b> Эллипсометрический комплекс терагерцового диапазона . . . . .	115
<b>А.С. Перин, В.Ю. Рябчёнок, В.М. Шандаров</b> Влияние пироэлектрического эффекта на характеристики линейной и нелинейной дифракции световых пучков в кристалле ниобата лития . . . . .	116
<b>А.В. Вишняков, В.А. Стучинский, Д.В. Брунёв, А.В. Зверев, С.А. Дворецкий</b> Определение объёмной и локальных длин диффузии носителей заряда в фоточувствительном слое матричных ИК-приёмников фотодиодного типа на основе материала кадмий-ртуть-теллур . . . . .	117
<b>Е.В. Богданов, Е.П. Кубашевский, Н.Я. Минина</b> Переключение поляризационных мод излучения лазерных диодов на основе n-AlGaAs/GaAsP/p-AlGaAs при внешних напряжениях . . . . .	118

<b>М.В. Боев, В.М. Ковалев, А.В. Чаплик</b> Генерация акустических волн двумерным экситонным газом . . . . .	119
<b>В.С. Варавин, Д.В. Марин, М.В. Якушев</b> Рекомбинация носителей заряда в структурах $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te/Si(013)$ . . . . .	120
<i>Т.В. Малин, А.М. Гилинский, В.Г. Мансуров, Д.Ю. Протасов, А.В. Кожухов, Е.Б. Якимов, О.В. Кибис, К.С. Журавлев</i> Возрастание диффузионной длины неосновных носителей заряда в твердых растворах $Al_xGa_{1-x}N$ ( $x=0\dots 0,1$ ), выращенных методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии . .	121
<i>В.В. Атучин, В.Н. Кручинин, С.В. Рыхлицкий, В.А. Кочубей, Л.Д. Покровский, С.В. Ратана</i> Оптические свойства высокоупорядоченных тонких пленок $V_2O_5$ . . . . .	122
<b>В.В. Малютина-Бронская, А.В. Семченко, В.Б. Залесский</b> Фотоэлектрические свойства пленок оксида цинка легированные редкоземельными металлами . . . . .	123
<b>С.Г. Нефёдов, В.В. Павлов, Р.В. Писарев</b> Анизотропия сверхбыстрого оптического эффекта Керра в GaAs . . . . .	124
<b>Ю.Г. Пейсахович, А.А. Штыгашев</b> Матричные элементы электрон-фотонного взаимодействия в кристаллической решетке конечной длины . . . . .	125
<b>К.М. Румынин, Д.С. Абрамкин, А.К. Бакаров, А.К. Гутаковский, Т.С. Шамирзаев</b> Энергетическое строение квантовых точек, сформированных в гетеросистеме InSb/AlAs .	126
<b>О.А. Шегай, О.Р. Баятова, А.К. Бакаров</b> Возникновение плато в фотопроводимости 2DEG AlGaAs/GaAs мезоструктур зигзагообразной формы . . . . .	127
<b>Д. Мелебаев</b> Фоточувствительность наноструктур Au-окисел-n-GaAs <sub>0,6</sub> P <sub>0,4</sub> в УФ области спектра . . . . .	128
<b>И.И. Ли, И.В. Мжельский, В.Г. Половинкин</b> Об оптимизации конструктивных параметров ИК микроскопа . . . . .	129
<b>Д.В. Марин, М.В. Якушев</b> О путях снижения плотности V-дефектов в гетероструктурах $Cd_xHg_{1-x}Te$ выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из Si(310) . . . . .	130
<i>А.П. Ковчавцев, А.А. Гузев, Д.В. Марин, А.В. Царенко, М.В. Якушев</i> Пассивация поверхности HgCdTe тонкими слоями CdTe . . . . .	131
<i>Д.В. Бородин, Д.В. Брунев, В.С. Варавин, В.В. Васильев, А.В. Вишняков, С.А. Дворецкий, А.В. Предеин, И.В. Сабина, Г.Ю. Сидоров, А.О. Сусяков, М.В. Якушев</i> Сверхдлинноволновые линейчатые фотоприемники для дистанционного зондирования Земли . . . . .	132
<i>А.К. Бакаров, Н.А. Валишева, К.С. Журавлев, А.П. Ковчавцев, А.Е. Настовьяк, А.И. Торопов, А.В. Царенко</i> Характеристика слоев InAlSb для ИК фотоприемников, полученных методом МЛЭ . . . . .	133

<i>I. Yahniuk, G. Grabecki, M. Majewicz, J. Wróbel, T. Dietl, G. Cywiński, C. Skierbiszewski, S.S. Krishtopenko, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, F. Teppe, W. Knap</i> Pressure-driven transition from topological insulator into band insulator phase in HgTe quantum well .....	134
<i>А.В. Войцеховский, С.Н. Несмелов, С.М. Дзядух, В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, Ю.Г. Сидоров, Г.Ю. Сидоров</i> Адмиттанс структур металл-диэлектрик-полупроводник на основе HgCdTe с приповерхностными широкозонными слоями, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии .....	135
<i>Н.М. Куляхтина, А.В. Никонов, К.О. Болтарь, Н.И. Яковлева</i> Исследование оптических характеристик эпитаксиальных слоёв InGaAsP .....	136
<i>А.В. Никонов, К.О. Болтарь, И.Д. Бурлаков, Н.И. Яковлева</i> Исследование спектральных характеристик многослойных гетероэпитаксиальных структур ИК- и УФ-диапазонов .....	137
<i>Г.Ю. Сидоров, И.В. Сабина, В.В. Васильев, А.П. Ковчавцев, А.Е. Настовьяк, А.В. Царенко</i> Пассивация поверхности HgCdTe тонкими пленками Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> полученными методом атомно-слоевого осаждения из ТМА .....	138
<i>Н.Х. Талипов, А.В. Войцеховский</i> Оптимизация технологии формирования многоэлементных матричных ИК-фотоприемников на основе МЛЭ слоев Cd <sub>x</sub> Hg <sub>1-x</sub> Te .....	139
<i>М.О. Петрушков, Е.А. Емельянов, М.А. Путьто, Б.Р. Семягин, Н.А. Паханов, О.П. Пчеляков, В. В. Преображенский</i> Выращивание гетероструктур АПВВ на подложках кремния методом МЛЭ для фотоэлектрических преобразователей .....	140
<i>А.В. Шевлягин, Н.Г. Галкин, Д.Л. Горошко, А.К. Гутаковский</i> Кремний-силицидные нанокompозитные фотодетекторы ближнего инфракрасного диапазона .....	141
<i>П.П. Добровольский, Л.С. Марченко, П.А. Алдохин</i> Исследования поглощающих покрытий холодных диафрагм в фотоприёмных устройствах ИК диапазона .....	142
<i>Е.А. Колосовский</i> Анализ тонких оптических эффектов с помощью метода линий для интерферометра Маха-Цендера на основе Y-разветвителей .....	143
<i>А.А. Лямкина, С.П. Мощенко</i> Влияние формы металлической частицы на экситон-плазмонное взаимодействие с точечным диполем .....	144
<i>А.Э. Симанчук, С.Н. Атутов, Н.А. Валишева, С.Л. Микерин, А.И. Плеханов, В.А. Сорокин, А.В. Якиманский</i> Нелинейно-оптические свойства хромофорсодержащих полиимидов и электрооптические устройства на их основе .....	145
<i>И.О. Парм, А.В. Предеин, В.С. Варавин, В.В. Васильев</i> Плазмохимический оксинитрид в реакторе с плазмой индукционного типа для пассивации гетероэпитаксиальных структур КРТ выращенных методом МЛЭ .....	146
<i>Р.М. Тазиев, И.В. Юнусов</i> Численное исследование полимерного электрооптического модулятора на микрополосковой линии .....	147

<b>М.Ю. Барабаненков, А.Г. Итальянцев</b> Узкополосные спектральные фильтры на основе нитяных ди-фракционных решеток и фотонных структур .....	148
<b>М.Ю. Барабаненков, А.Г. Итальянцев</b> Магнитный отклик кластера немагнитных наночастиц при рассеянии электромагнитного излучения .....	149
<b>И.В. Осинных, Т.В. Малин, В.Ф. Плюснин, К.С. Журавлев</b> Исследование зеленой полосы в спектрах фотолюминесценции сильно легированных слоев AlGaIn:Si с молярной долей Al выше 0.5 .....	150
<b>Г.М. Борисов, В.Г. Гольдорт, Д.В. Ледовских, А. А. Ковалёв, М.Н. Пуятто, В.В. Преображенский, Н.Н. Рубцова, Б. Р. Семягин</b> Кинетика релаксации полупроводниковых наноструктур $A_3B_5$ , предназначенных для пассивной синхронизации мод лазеров .....	151
<b>К.В. Феклистов, Д.С. Абрамкин</b> Фотолюминесценция эрбия в $Ta_2O_5$ .....	152
<b>М.Г. Ноппе</b> О моделировании естественной ширины линий в полупроводниковых лазерах .....	153
<b>А.А. Андронов, Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков; Д.Е. Святошенко, А.В. Маругин, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий</b> Стимулированное излучение и вертикально излучающие лазеры на двойных гетероструктурах кадмий-ртуть теллур с оптической накачкой на длине волны около 1 микрона .....	154
<b>Д.В. Горшков, Н.И. Беспалко, Д.В. Горшков, М.В. Лобкин, С.А. Кесаев, С.Н. Косолюбов, С.А. Рожков, Г.Э. Шайблер, А.С. Терехов</b> Вклад фотоэлектронных явлений в р-GaAs (Cs,O) – фотокатоде и в промежутке фотокатод – МКП в частотно-контрастную характеристику планарного ЭОП .....	155
<b>Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов, В.В. Васильев</b> 3D фотоматрица видимого диапазона для регистрации быстрых процессов .....	156
<b>Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов, В.В. Васильев</b> КМОП мультиплексоры форматов $6 \times 576$ , $3 \times 4 \times 576$ , $64 \times 64$ , $1 \times 64$ для гибридных ИК ФПУ .	157
<b>Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов, Т.И. Анисимова, Д.С. Ельников, Е.В. Костюков, А.М. Маклаков, В.Ю. Ноженко, А.А. Пугачёв, Н.И. Роцина, А.С. Скрылёв, С.В. Трунов, Ю.М. Череменин</b> Отечественные КМОП фотоприемники 4/3" и 1/3" .....	158
<b>Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов</b> Отечественный КМОП фотоприемник 4/3", 1Мп при малых временах интегрирования и при больших освещенностях .....	159
<b>М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, А.И. Козлов, В.Н. Овсяк</b> Кремниевые мультиплексоры фотосигналов инфракрасных фотоприемников для гражданских применений .....	160
<b>М.А. Демьяненко, А.И. Козлов, В.Н. Овсяк</b> Влияние параметров кремниевой схемы считывания фотосигналов и матрицы детекторов инфракрасного диапазона на характеристики фотоприемников .....	161
<b>И.Б. Чистохин, Н.А. Валишева, В.В. Преображенский, А.С. Скрылёв, В.В. Чернокожин, М.М. Крымко, Ю.В. Брашеван, Ю.И. Завадский</b> Характеризация элементов матричного фотоприёмника на основе гетероструктур InP/InGaAs .....	162

<b>С.А. Кузнецов, А.Г. Паулиш</b> Ультратонкие резонансные поглотители для болометрических детекторов субмиллиметрового диапазона . . . . .	163
<b>С.А. Кузнецов</b> Микроструктурные квазиоптические селективные элементы для диапазонов миллиметровых и терагерцевых волн . . . . .	164
<b>С.В. Рыхлицкий, С.А. Дулин, В.Ю. Прокопьев, Е.К. Иванов, Н.А. Аульченко, Н.И. Назаров</b> Технологический контроль оптических материалов фотоники по параметру объемного рассеяния . . . . .	165
<b>В.В. Карпов, В.П. Астахов, М.Е. Козырев, В.Ф. Чишко, В.И. Петренко, В.И. Семенов, Я.В. Гицилевич, Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов, В.В. Васильев</b> Быстродействующее малоформатное ФПУ 64x64 элементов на основе антимонида индия . .	166
<b>Д.В. Алантьев, С.В. Хрящев</b> Результаты экспериментального исследования электроуправляемого широкоспектрального объектива с жидкостными линзами . . . . .	167
<b>Б.Г. Вайнер</b> Коротковолновые спектрально-узкополосные тепловизионные приемники ИК излучения в физических исследованиях . . . . .	168
<b>А.В. Голицын, В.В. Шелковников</b> Исследования жидкостной оптики . . . . .	169
<b>А.В. Голицын, Н.А. Сейфи</b> Численная оценка дисперсии «идеального» жидкостного оптического материала для устранения хроматизма положения . . . . .	170
<b>С.М. Борзов, А.В. Голицын, М.Ю. Цивинский</b> Перспективы использования электроуправляемых жидкостных линз в оптико-электронных системах . . . . .	171
<b>А.А. Голицын</b> Реализация алгоритма кусочно-линейного изменения контрастности изображения в приборах наблюдения . . . . .	172
<b>С.А. Дворецкий, А.В. Зверев, Ю.С. Макаров, Е.А. Михантьев</b> Быстродействующая малопотребляющая кремниевая интегральная схема считывания формата 384x288 для матричных ИК фотоприемников средневолнового и длинноволнового диапазонов . . . . .	173
<b>Г.Е. Журов, М.Ю. Цивинский</b> Малопотребляющий высокоскоростной модуль Ethernet 1G для многоканальных оптико-электронных приборов . . . . .	174
<b>М.Ю. Цивинский</b> Исследование и реализация алгоритмов автофокусировки для видимого и теплового спектральных диапазонов . . . . .	175
<b>И.В. Мажельский, В.М. Базовкин, В.Г. Половинкин</b> Сканирующий инфракрасный микроскоп с высоким пространственным разрешением . . . .	176
<b>С.В. Мутилин, Л.В. Яковкина, Н.Д. Волчок, А.Ф. Булдыгин, В.Я. Принц</b> Формирование и исследование свободных пленок VO <sub>2</sub> , предназначенных для ИК и терагерцевых фотоприемников . . . . .	177

<i>Г.Г. Горбунов, К.Н. Чиков, В.Б. Шлишевский</i> Гипер- и ультраспектральная видеоспектрометрия: методические и технические аспекты . . .	178
<i>Э.Г. Косцов, В.С. Соболев</i> Быстродействующий неохлаждаемый тепловой приемник излучения на основе тонких пироэлектрических пленок . . . . .	179
<i>С.А. Кузнецов, С.Н. Макаров, В.Н. Кошеленко, А.В. Аржанников</i> Визуализация и дистанционное зондирование объектов в диапазоне миллиметровых волн с использованием техники ЛЧМ-радара . . . . .	180
<i>С.А. Кузнецов, М.А. Астафьев, А.В. Генцелев, С.Г. Баев</i> Фильтры высоких частот и плоские фокусаторы субмиллиметрового диапазона на основе LIGA-структур . . . . .	181
<i>С.А. Кузнецов, М.А. Астафьев</i> Фокусировка субмиллиметрового излучения в сложные области посредством субволновых голографических структур . . . . .	182
<i>В.В. Карпов, А.В. Мартиросов, В.И. Петренко, В.И. Семенов, К.В. Чиж</i> Стенд измерения фотоэлектрических параметров матричных фотоприемных устройств . . .	183
<i>И.И. Ли, Н.В. Гришанов</i> Цифровой кремниевый мультиплексор для многоэлементных ИК ФПУ коротковолнового диапазона . . . . .	184
<i>В.Г. Половинкин, А.П. Ковчавцев, А.В. Царенко, А.Е. Настовьяк</i> Точно решаемая квантовая модель ОПЗ полупроводника . . . . .	185
Алфавитный указатель . . . . .	186
Список участников . . . . .	191

## Космическая фотосенсорика

**И.Д. Бурлаков**<sup>1,2</sup>, В.П. Пономаренко<sup>1,3</sup>, А.М. Филачев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион», Москва, ул. Косинская, д. 9, 111538

<sup>2</sup> МГТУ МИРЭА, Москва, пр-т Вернадского, д. 78, 119154

<sup>3</sup> МФТИ (ГУ), г. Долгопрудный, МО, Институтский пер., д.9, 141700

*тел.: (499) 374-4900, эл. почта: orion@orion-ir.ru*

Космическая фотосенсорика решает задачи создания фотоэлектронных изделий для оптико-электронной аппаратуры, предназначенной для мониторинга поверхности суши и океана, обнаружения летательных аппаратов и объектов на фоне Земли, контроля космического пространства, обнаружения космических объектов как с Земли, так и из космоса и ряда других задач. Направление является стратегически важным. В нем сконцентрированы самые наукоемкие технологии из областей микроэлектроники, оптики, микрокриогеники, материаловедения, информатики и других современных областей науки и техники, признанных в мире критическими технологиями 21 века. На космические платформы возлагается ряд ответственных задач как в области обороны и безопасности страны, так и народнохозяйственных задач, которые решаются с использованием оптико-электронных систем, работающих во всех диапазонах оптического спектра, в том числе в инфракрасном. Ключевой проблемой космической фотоэлектроники является создание необходимой элементной базы – фотоприемников и фотоприемных устройств (ФПУ), прежде всего нового поколения.

Одним из примеров инновационных разработок космической фотоэлектроники является многоспектральная аппаратура мониторинга земли и суши. Основным направлением использования этой аппаратуры является гидрометеорология, вместе с тем она позволяет решать и ряд других задач, например, разведку полезных ископаемых, мониторинг сельскохозяйственных площадей, обнаружение техногенных катастроф и др. В 2012 году запущен первый КА этой системы – «Электро-Л». Для его полезной оптико-электронной нагрузки АО «НПО «Орион» разработало и поставило комплект многорядных ФПУ формата 2×96 элементов со спектральной чувствительностью в диапазоне от 3,5 до 12 мкм. Аппаратура КА «Электро-Л» позволяет получать изображения и спектральную информацию с новым, недостижимым ранее, качеством. В 2015-2016 гг. планируется запуск еще двух КА серии «Электро», а также КА «Арктика-М» для мониторинга поверхности и атмосферы в северных широтах. Для них АО «НПО «Орион» разработало и поставляет комплекты ФПУ из 7 штук формата 4×288 элементов со спектральной чувствительностью от 3,5 до 12,5 мкм, которые обеспечат еще более высокое качество изображений и информации.

Для бортовой оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования земной поверхности с КА «Канопус-В-ИК» изготавливаются ФПУ формата 4×288 элементов на спектральные диапазоны 3–5 и 8–12 мкм.

В настоящее время АО «НПО «Орион» выполняет в интересах Роскосмоса ряд других разработок для перспективной аппаратуры космического базирования, в том числе для широкозахватного многоканального отображающего ИК-радиометра системы дистанционного зондирования Земли на основе ФПУ с шестью многоспектральными «линейками» формата 4×576 элементов, работающими в режиме ВЗН в спектральных диапазонах от 3 до 12,5 мкм.

В целом реализация рассмотренных проектов позволила существенно изменить ситуацию во всей космической фотоэлектронике, создав благоприятную ситуацию для модернизации целой группы важнейшей аппаратуры космического базирования.

# Потенциальные возможности Новосибирского лазера на свободных электронах (NovoFEL) для исследований в области длин волн (240 ÷ 5) мкм

Г.Н. Кулипанов и команда NovoFEL  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

В настоящее время в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера работают два лазера на свободных электронах (ЛСЭ) терагерцового и дальнего ИК диапазонов. В июле 2015 года получена генерация на третьем ЛСЭ, который будет работать в ИК диапазоне.

Параметры лазеров представлены в таблице 1.

Таблица 1

Stage	1 <sup>st</sup> stage (1 track)	2 <sup>nd</sup> stage (2 tracks)	3 <sup>rd</sup> stage (4 tracks)
Status	In operation since 2003	In operation since 2009	In operation since 2015
Wavelength, $\mu\text{m}$	90 - 240	40 - 90	5 - 40
Relative line width at a half-height, %	0.3 – 1.0	0.2 - 1	0.1 - 1
Maximum average power, kW	0.5	0.5 - 1	10
Maximum peak power, MW	1.0	2.0	10
Pulse duration, ps	40 - 100	20 - 40	10 - 20
Pulse repetition rate, MHz	2.8 - 5.6 - 11.2 – (22.4)		
Linear polarization degree, %	> 99.6		

The power and relative line width obtained in the terahertz range (the 1<sup>st</sup> stage) are record parameters.

Работа ЛСЭ базируется на четырехоборотном ускорителе-рекуператоре с максимальной энергией до 50 МэВ. Рекуперация позволяет снизить радиационную опасность установки, повысить средний ток в ускорителе и, в результате, иметь рекордные параметры пучков лазерного излучения.

Независимо от мощности, все ЛСЭ имеют большой размер и высокую стоимость. Адекватным использованием ЛСЭ является организация на его базе исследовательского центра коллективного пользования, обеспечивающего работу большого количества исследовательских групп из различных физических, химических и биологических институтов.

В докладе описана работа NovoFEL как исследовательского центра, в котором уже сейчас работают более 20 исследовательских групп из Новосибирска, Москвы, Томска, Нижнего Новгорода, Самары, Ю.Кореи и других центров.

Мы надеемся, что начало работы третьего ЛСЭ, повышение надежности и стабильности работы всех трех ЛСЭ, позволит существенно расширить круг задач и пользователей нашей уникальной установки.

## Лазерная нанолитография

Ю.Н. Кульчин<sup>1</sup>, О.Б. Витрик<sup>1</sup>, А.А. Кучмижак<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматизики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Радио, 5  
тел: 8(423)2310439, факс: 8(423)2310452, эл. почта: kulchin@iacp.dvo.ru

Функциональные плазмонные наноструктуры (ФПН) субволнового размера, объединенные в упорядоченные массивы и изготовленные на поверхности диэлектрических подложек, благодаря своим уникальным оптическим и спектральным свойствам являются объектами повышенного научного интереса. Множество перспективных применений плазмонных наноструктур в таких активно развивающихся областях науки, как нанофотоника, микроскопия сверхразрешения, биосенсорика, наномедицина и фотовольтаика было теоретически предсказано и экспериментально реализовано в последние два десятилетия. Современные научные задачи, возникающие в этих областях исследований, предъявляют самые жесткие требования к методикам изготовления ФПН. Методики фабрикации должны сочетать возможность контроля геометрических размеров отдельных объединенных в упорядоченный массив нанозаэментов с высокой производительностью, относительно низкой стоимостью полученных на выходе наноструктур, а также возможностью создания единичных наноразмерные ФПН в заданной точке пространства, например на торце волоконного световода или наконечнике сканирующего зонда.

Метод прямого наноструктурирования металлических пленок остросфокусированными короткими и сверхкороткими лазерными импульсами показал, что может выступить перспективной альтернативой широкораспространенным методам ионно-лучевого травления и химического синтеза в задачах фабрикации ФПН [1]. Воздействие таких импульсов инициирует в металлических пленках ряд сверхбыстрых тепловых, гидродинамических и электродинамических процессов, селективное и контролируемое использование которых позволяет формировать большое количество разнообразных ФПН [2]. В настоящей работе продемонстрировано, что использование прямого одноимпульсного воздействия остросфокусированного лазерного импульса в сочетании с методикой медленной полировки пучком ускоренных ионов аргона позволяет формировать упорядоченные массивы плазмонных наностырей, нанокольцев, наноотверстий, нанокорон, а также сложных комбинированных структур [3], в то время как облучение металлических пленок двумя последовательными пространственно смещенными импульсами позволяет записывать массивы наноантенн с дополнительным фокусирующим элементом в виде плазмонной решетки [4]. Обсуждаются возможные применения изготовленных ФПН в задачах усиления сигналов фотолюминесценции и комбинационного рассеяния молекул органических красителей, белковых соединений, а также комплексов, содержащих ионы редкоземельных металлов.

### Литература

- [1] Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.A. Kuchmizhak, V.I. Emel'yanov, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov and S.V. Makarov. *Phys. Rev. E*, 023017 (2014).
- [2] A. Kuchmizhak, S. Gurbatov, Y. Kulchin, O. Vitrik, S. Makarov, S. Kudryashov and A. Ionin, *Appl. Surf. Sci.* **337**, 224 (2015).
- [3] A. Kuchmizhak, S. Gurbatov, Y. Kulchin, O. Vitrik, *Opt. Comm.* (in press, 2015)
- [4] A.A. Kuchmizhak, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, and S.V. Makarov, A.A. Rudenko, Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, T.V. Efimov, *Opt. Lett.* **40**, 1687 (2015).

## **Фотоприемные устройства на основе гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия и ртути**

Д.В. Брунев, В.В. Васильев, В.С. Варавин, А.В. Вишняков, **С.А. Дворецкий**,  
И.В. Марчишин, Н.Н. Михайлов, И.В. Сабина, Г.Ю. Сидоров,  
Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев, А.В. Латышев  
ФГБУН Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова,  
Новосибирск, 630090, пр.Лаврентьева 13  
тел./факс: (383) 330-49-67, эл. почта: [dvor@isp.nsc.ru](mailto:dvor@isp.nsc.ru)

В ИФП СО РАН разработаны и изготовлены инфракрасные (ИК) матричные фотоприемные устройства (МФПУ) форматов 320×256 элементов с шагом 30 мкм для спектральных диапазонов 3-5 мкм (МФПУ-01Б) и 8-10 мкм (МФПУ-01А) и полноформатные 640×512 элементов с шагом 25 мкм для спектральных диапазонов 3-5 мкм (МФПУ-С) и 8-10 мкм (МФПУ-Д). МФПУ состоит из инфракрасного фотоприемника (ИК ФП) формата 320×256 или 640×512 элементов, вакуумного криостатируемого корпуса (ВКК) и микрокриогенной системы охлаждения (МКСО). ИК фотоприемник (ФП) представляет собой гибридную сборку матричного фотодиодного фоточувствительного элемента (МФЧЭ) и кремниевого мультиплексора. МФЧЭ изготовлены на основе гетероструктур (ГЭС) теллурида кадмия и ртути (КРТ, HgCdTe) со специальным профилем распределения состава по толщине, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках из GaAs или Si. Фотодиоды на основе N-p перехода получены с помощью ионного легирования бором слоев КРТ дырочного типа проводимости, полученного при термическом отжиге ГЭС КРТ МЛЭ. Мультиплексор позволяет проводить управление временем накопления и кадровой частотой с помощью внешнего сигнала, режимами работы с помощью последовательного и параллельного интерфейсов.

Унифицированный ВКК построен с применением кольцевого металлокерамического разъема и обеспечивает суммарную тепловую нагрузку с учетом тепловыделения фотоприемника не более 0,5 Вт при температуре окружающей среды +55<sup>0</sup>С и температуре криостатирования 77К. Охлаждаемая диафрагма обеспечивает апертурный угол зрения 28×34 град. Охлаждаемый оптический фильтр имеет коротковолновую границу чувствительности 3,4 мкм и 7,7 мкм для МФПУ спектрального диапазона 3-5 и 8-10 мкм, соответственно.

В составе МФПУ применены МКСО производства ООО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск): МСМГ-0,6А-0,4/80 интегральной компоновки с рабочей температурой 80-120К и МСМГ-1,5А-0,3/65 компоновки «Сплит-Стирлинг» с рабочей температурой 70-82К.

Среднее значение эквивалентной шуму разницы температур (ЭШРТ) составили менее 25 мК и 35 мК для МФПУ спектрального диапазона 3-5 и 8-10 мкм, соответственно. Представлены данные по измерениям спектров, дефектности, зависимости ЭШРТ от температуры и при последовательных циклах нагрев-охлаждение.

## Асимметричные барьерные слои и их применение в полупроводниковых лазерах

А.Е. Жуков<sup>1</sup>, М.В. Максимов<sup>1,2</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>2,1</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>,  
Ф.И. Зубов<sup>1</sup>, А.С. Паюсов<sup>1,2</sup>, Ю.В. Кудашова<sup>1</sup>, Е.С. Семенова<sup>3</sup>, Л.В. Асрян<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Академический университет, Санкт-Петербург, 194021, Хлопина 8

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021,  
Политехническая, 26

<sup>3</sup> DTU Fotonik, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, DK-2800, Denmark

<sup>4</sup> Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061, USA

тел: (812) 4488594, факс: (812) 4486994, эл. почта: [zhukale@gmail.com](mailto:zhukale@gmail.com)

Продemonстрировано повышение температурной стабильности и улучшение линейности ватт-амперной характеристики в лазерах с асимметричными барьерными слоями (ЛАБС) по сравнению с лазерами традиционной конструкции.

### Основные результаты

Рекомбинация носителей заряда в волноводе лазера приводит к росту температурной чувствительности и снижению дифференциальной эффективности с ростом тока накачки. Нами были созданы инжекционные лазеры с квантовыми ямами AlGaAs/GaAs, содержащие асимметричные барьерные слои InGaP и InAlGaAs, блокирующие транспорт носителей заряда того или иного типа, за счет чего удается подавить паразитную рекомбинацию [1].

ЛАБС продемонстрировали улучшение характеристической температуры порогового тока и дифференциальной эффективности, подавление роста внутренних потерь с температурой по сравнению с тестовыми лазерами без асимметричных барьеров [2].

Нами также продемонстрировано, что использование асимметричных барьеров позволяет подавить нелинейность ВтАХ в режиме больших токов, что приводит к заметному снижению рабочего тока, Рис. 1.

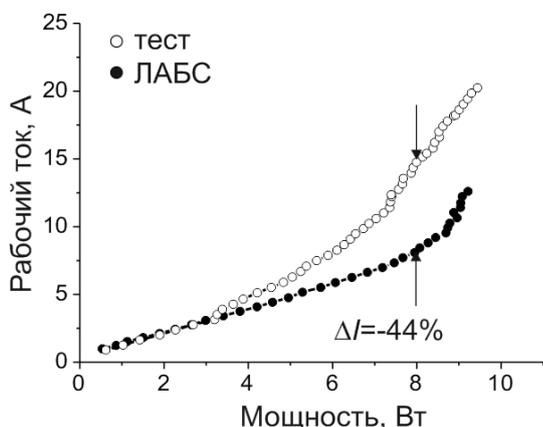


Рис. 1. Зависимость рабочего тока от мощности излучения для ЛАБС и лазера традиционной конструкции.

Исследования спектров люминесценции коротких лазерных диодов, в которых лазерная генерация подавлена, продемонстрировало снижение интенсивности полосы излучения, обусловленной рекомбинацией носителей в волноводе.

### Литература

[1] L.V. Asryan, N.V. Kryzhanovskaya, M.V. Maximov, et al, *Semicond. Sci. Technol.* **26**, 055025 (2011).

[2] A.E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, F.I. Zubov, et al, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 021107 (2012).

# Быстродействующие вертикально-излучающие лазеры

В. М. Устинов

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 297-3178, факс: (812) 297-3178, эл. почта: vmust@beam.ioffe.ru

Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) спектрального диапазона 850 нм широко применяются в оптоволоконных системах связи на короткие и средние дистанции. В последние годы значительный интерес вызывает поиск оптимальных конструкций ВИЛ для реализации передачи данных на скоростях до 25 Гбит/с и выше в режиме прямой токовой модуляции.

Хорошие перспективы для использования в качестве активной области температурно-стабильных быстродействующих ВИЛ демонстрируют напряженные квантово-размерные гетероструктуры InAlGaAs в матрице AlGaAs, позволяющие существенно увеличить дифференциальное усиление и одновременно улучшить температурную стабильность ВИЛ за счет улучшения локализации носителей в активной области. Высокое быстродействие (частотная полоса эффективной модуляции более 20 ГГц) достигается при использовании оптических микрорезонаторов с несколькими слоями токовых апертур, сформированных с помощью селективного окисления слоев AlGaAs с высоким содержанием Al, что позволяет снизить внутренние паразитные емкости. Паразитная емкость контактных площадок может быть минимизирована путем их размещения на толстом (несколько мкм) слое диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью (полиамида или бензоциклобутена). При этом целесообразно использовать копланарную геометрию контактных площадок, что позволяет проводить измерения высокочастотных характеристик на пластине до разделения на кристаллы. Важным аспектом при практическом внедрении высокоскоростных ВИЛ является обеспечение надежности приборов с несколькими апертурными слоями, вносящими дополнительные механические напряжения.

Использование перечисленных подходов в сочетании с оптимизацией эпитаксиальной технологии выращивания гетероструктур и технологии изготовления приборов позволило реализовать ВИЛ, обеспечивающие скорость передачи данных более 25 Гбит/с на дистанцию более 100 м по многомодовому оптическому волокну в диапазоне рабочих температур 20-85°C с требуемым уровнем надежности [1,2].

Автор выражает благодарность С.А.Блохину, D.Bimberg, М.А.Боброву, А.Г.Кузьменкову, Л.Я.Карачинскому, Н.Н.Леденцову, J.A.Lott, Н.А.Малееву за существенный вклад в результаты выполненных исследований.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (RFMEFI57714X0001) и РФФИ (14-02-00962, 13-02-12142-офи\_м).

## Литература

- [1] S.A.Blokhin, J.A.Lott, N.N.Ledentsov, L.Ya.Karachinsky, A.G.Kuzmenkov, I.I.Novikov, N.A.Maleev, G.Fiol, D.Bimberg, «25 Gb/s 850 nm optical components operating at 85°C», ESLW 2011, Lausanne, Switzerland, 23-24 Sept. 2011
- [2] С.А.Блохин, Л.Я.Карачинский, И.И.Новиков, А.С.Паюсов, А.М.Надточий, М.А.Бобров, А.Г.Кузьменков, Н.А.Малеев, Н.Н.Леденцов, В.М.Устинов, Д.Бимберг, ФТП 48, 81 (2014)

## Стимулированные излучения на переходах между лестницами Ванье-Штарка в полупроводниковых сверхрешетках

А.А.Андронов, Е.П.Додин, Ю.Н.Ноздрин, Д.И.Зинченко<sup>1</sup>; М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица<sup>2</sup>; В.А.Беляков, И.В.Ладенков, А.Г. Фефелов<sup>3</sup>;

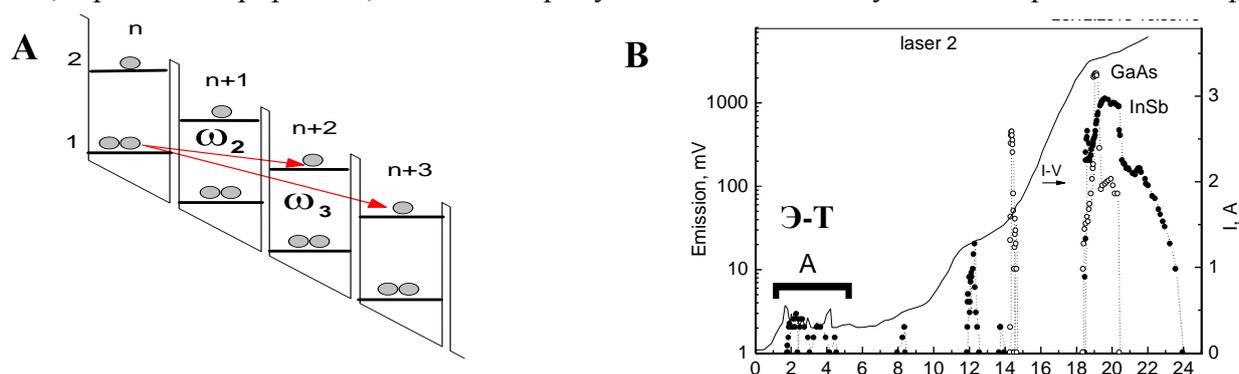
<sup>1</sup> ИФМ РАН, Н.Новгород, 603950, ул.Академическая 7

<sup>2</sup> ФГУП «Салют», Н.Новгород, 603950, ул. Ларина 7

<sup>3</sup> «Сигм-Плюс» Москва, 117342, ул. Введенского 3

Тел. (831) 417-94-73. ФАКС (831) 417-94-73, эл. почта: andron@ipmras.ru

Продемонстрированы новые лазеры на основе простых сверхрешеток (СР) GaAs-GaAlAs со слабыми барьерами - Ванье-штарковские (В.-Ш.) лазеры. Механизм усиления (РисА) в лазерах основан на инверсии населенности между основным уровнем В.-Ш. в ямах СР и слабо заселенным верхним уровнем В.-Ш. в ямах два, три, четыре периода вниз по приложенному потенциалу [1]. Механизм является обобщением второго предложения Казаринова и Сурица 1972 г; первое привело к созданию каскадных лазеров. В чипах лазеров обнаружены множественные области интенсивного стимулированного СВЧ излучения при резонансах между лестницами В.-Ш. СР [2]. В одном из чипов излучение, существует на частоте около 7.3ТГц, при температуре до 150К, и по оценке имеет мощность до 1 Ватта. В тоже время, продемонстрировано, что все атрибуты механизма излучения сохраняются и при



А - Схема 2-х лестниц уровней В.Ш. в СР в электрическом поле и переходов между ними. В - ВАХ и сигналы детекторов GaAs и InSb для одного из чипов. Э-Т - область ОДП Эсаки - Тсу

300К. Пластина со СР выращена методом МOCVD, имеет 1000 периодов и стоп слой для создания терагерцового резонатора метал-СР-метал. ТГц излучение не наблюдалось из-за малого коэффициента усиления в сравнении с потерями в резонаторе, ввиду малой остаточной концентрации электронов в СР ( $\approx 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) и потерь в терагерцовом резонаторе. Эксперименты, расчеты и обсуждения показывают, что при оптимизации параметров СР на подобных СР со слабыми барьерами могут стать основой для источников излучения на частотах от ГГц до ТГц и выше с хорошей эффективностью.

### Литература

[1] А. А. Андронов, Е. П. Додин и др., Квант. электрон., **40** вып.5 (2010), 400–405.

[2] А.А.Andronov, Е.Р.Dodin et al, Proc. 22 Inter Sympos. “Nanostructres: Physics and Tecnology”, S.Petersburg, June 23-27, 2014, pp 245-246

## Перспективы коллоидной оптоэлектроники

С.В.Гапоненко

Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси,

Пр. Независимости 68, Минск 220072, Беларусь

[s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by](mailto:s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by)

Современная физика и химия коллоидных наноструктур позволяет синтезировать нанокристаллы полупроводниковых, металлических и диэлектрических материалов, структуры типа ядро-оболочка, а также плотно упакованные ансамбли нанокристаллов. Кроме того слои коллоидных наночастиц могут использоваться как маски для фотолитографии. Полупроводниковые и металлические коллоидные наночастицы могут быть химически связаны как с органическими молекулами, так и между собой. Ниже перечислены основные физические эффекты и приборы, которые могут быть созданы на их основе.

Квантовые размерные эффекты в одиночных полупроводниковых нанокристаллах размером порядка 2-20 нм (соизмеримы с длиной волны де Бройля электрона при комнатной температуре) и структурах «ядро-оболочка»:

- оптические фильтры (уже применяются);
- лазерные затворы для получения нано- и пикосекундных импульсов в твердотельных лазерах (реализованы для целого ряда лазеров);
- люминофоры, включая биометки, преобразователи спектра для белых светодиодов, спектральные конверторы лазерного излучения (начато применение в компактных дисплеях ай-падов и мобильных телефонов);
- светодиоды (продемонстрирована принципиальная возможность);
- лазеры (продемонстрирована принципиальная возможность);
- электрооптические модуляторы (на стадии лабораторных исследований);
- рамановские метки для биоисследований (сформулирована концепция);
- солнечные элементы (на стадии лабораторных исследований).

Квантовые размерные эффекты в плотноупакованных ансамблях полупроводниковых нанокристаллов:

- фототранзисторы (на стадии лабораторных исследований).

Синтез полупроводниковых нанокристаллов стержневидной формы и нанопластинок приближает оптические свойства коллоидных наноструктур к квантовым проволокам и квантовым ямам, сопровождается сильным увеличением энергии связи экситона вследствие кулоновского взаимодействия квазичастиц через матрицу и может усилить полезные свойства нанокристаллов.

Наночастицы металлов, соизмеримые с длиной свободного пробега электронов (примерно 20-100 нм) могут быть использованы для создания оптических сенсоров, основанных на зависимости спектра экстинкции от диэлектрической проницаемости среды, для гигантского усиления сигналов комбинационного рассеяния света и инфракрасного поглощения в молекулярной аналитической спектроскопии, для усиления поглощения и интенсивности фотолюминесценции в различных устройствах (дисплеи, солнечные элементы, биофлуоресцентные детекторы).

Диэлектрические наночастицы размером порядка длины волны оптического излучения (100-1000 нм) могут использоваться для создания т.н. фотонных кристаллов, антиотражающих покрытий, литографических масок, селективных фильтров и других компонентов.

Анализ публикаций последних лет позволяет говорить о зарождении новой технологической платформы в области оптоэлектроники – коллоидной нанофотоники.

## Высокоорганизованные J-агрегаты полиметиновых красителей как сенсоры в фотоэлектронике

Б.И.Шапиро

*Московский государственный университет тонких химических технологий  
им.М.В.Ломоносова*

В настоящее время при широком развитии оптических методов записи, обработки и воспроизведения информации в рамках нанотехнологий особое значение приобретают агрегаты, построенные из малого числа окрашенных органических соединений – красителей. В частности, речь идет о разработке методов управляемого формирования молекулярных ансамблей определенного строения с заданными оптическими и электронными свойствами, которые могут представлять интерес в системах оптического преобразования информации, в том числе в «оптических» компьютерах [1]. Агрегаты полиметиновых красителей, как потенциальные светочувствительные элементы для оптонаноэлектроники, вызывают особенно значительный интерес. Интенсивное поглощение света и высокий квантовый выход генерации носителей зарядов в них при действии света делает их перспективными в качестве фотоприемников излучения, химических индикаторов и фотовольтаических преобразователей [1, 2].

Агрегаты представляют собой нековалентно связанные органические полупроводники со строго организованной структурой полимера [1,2]. На основании изучения равновесия между димерами и J-агрегатами анионных красителей был предложен новый “блочный” механизм формирования агрегатов из димеров [2].

Существенное влияние на агрегацию анионных красителей оказывают катионы металлов [2]. Показано, что в водных растворах с увеличением заряда катиона концентрация электролита, стимулирующая агрегацию, уменьшается, а скорость J-агрегации возрастает. Высказано предположение, что самопроизвольная сборка агрегатов становится более надежной при участии каркасообразующих посторонних партнеров, которыми могут быть катионы [2]. Разработан процесс управляемой кристаллизации красителей под действием многозарядных неорганических катионов. Показано, что в металлокомплексных J-агрегатах полиметиновых красителей в полной мере сохраняются экситонные свойства органических полупроводников, благодаря которым в слоях J-агрегатов наблюдается значительный фотоотклик.

В работе [3] рассмотрен матричный синтез наноразмерных мультислойных агрегатов полиметиновых красителей. Показано, что J-агрегаты анионных красителей стимулируют рост на них агрегатов катионных красителей. Сделан вывод, что синтез высокоорганизованных многослойных структур агрегатов полиметиновых красителей перспективен для формирования элементов наноустройств для обработки оптической информации. Матричный синтез открывает путь к технологии «самосборки» наносхем для фотоэлектроники и оптроники.

### *Литература*

- [1] Шапиро Б.И. *Успехи химии*. 2006. Т.75. №5. С.484.
- [2] Шапиро Б.И. *Российские нанотехнологии*. 2008. Т.3. №3-4. С.72.
- [3] Шапиро Б.И., Саталкина Е.А., Некрасов А.Д. *Российские нанотехнологии*. 2014. Т.9. № 7-8. С.8.

## Синтез функциональных блоков для нелинейно-оптических хромофоров

В. В. Шелковников, Н. А. Орлова, И. Ю. Каргаполова

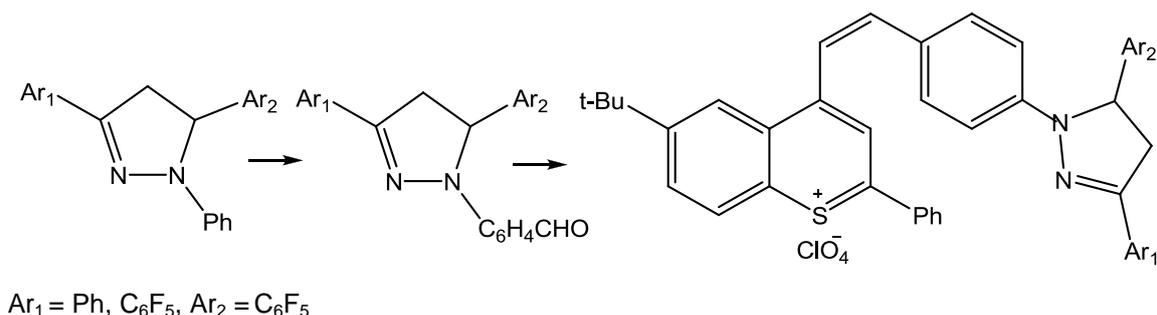
Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова,

Новосибирск, 630090, просп. Акад. Лаврентьева, 9.

тел: (383) 330 88 67., факс: (383) 330 9752., эл. почта: vice@nioch.nsc.ru

В последнее время в радиофотонике широко используются высокополярные хромофоры класса полиметиновых красителей. Синтез таких хромофоров проводят конденсацией ароматических или гетероциклических альдегидов с соединениями, содержащими активные метильные (метиленовые) группы. Известно, что введение полифторарильных остатков в молекулу флуорофора повышает ее стабильность [1,2]. Кроме того, наличие пентафторфенильных групп дает возможность вводить в них различные заместители и таким образом модифицировать хромофоры.

Нами были получены формилпиразолины, содержащие пентафторфенильные группы и синтезированы несимметричные полиметиновые красители на их основе.



### Литература

- [1] К.С. Шмуйлович, Н.А. Орлова, Е.В. Карпова, М.М. Шакиров, В.В. Шелковников, Изв. АН. Сер. хим., 2010, №7, 1378.
- [2] Д.Г. Переяслова, В.Т. Скрипкина, Б.М. Красовицкий, Г.Г. Якобсон, Изв. Сиб. отд. АН СССР, Сер.хим. наук., 1974, № 1, 81.

## Формирование лазерных пучков терагерцового диапазона на основе применения дифракционной компьютерной оптики

В.С. Павельев<sup>1,2</sup>, А.Н. Агафонов<sup>1</sup>, Н.А. Винокуров<sup>3,4</sup>, Б.О. Володкин<sup>1</sup>, Б.А. Князев<sup>3,4</sup>,  
Г.Н. Кулипанов<sup>3</sup>, В.А. Сойфер<sup>1,2</sup>, К.Н. Тукмаков<sup>1</sup>, Ю.Ю. Чопорова<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН

<sup>3</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

<sup>4</sup> Новосибирский государственный университет

тел: (846) 267-4843, факс: (846) 335-1836, эл. почта: pavelyev10@mail.ru

Появление мощных источников когерентного излучения терагерцового диапазона стимулировало создание оптической элементной базы для управления таким излучением. Известны результаты исследования кремниевых бинарных дифракционных линз и делителей пучка [1] для управления излучением Новосибирского лазера на свободных электронах. Такие приложения, как получение терагерцовых изображений (в том числе протяжённых объектов), абляция, генерация оптического разряда и другие, требуют фокусировки терагерцового излучения, часто – фокусировки с повышенной глубиной фокуса. Ранее [2] были получены результаты исследования оптических элементов видимого и ИК-диапазонов, предназначенных для фокусировки исходного лазерного пучка в соосный отрезок («протяжённый фокус»). В [3] приведены результаты исследования кремниевого бинарного дифракционного фокусатора, предназначенного для фокусировки гауссова пучка терагерцового лазера в соосный отрезок. В работе [4] приводятся первые результаты исследования бинарных кремниевых элементов, предназначенных для формирования одномодовых пучков (были выбраны моды Гаусса-Эрмита (1,0), Гаусса-Эрмита (1,1) и Гаусса-Лагерра (2,2)) из освещающего пучка лазера на свободных электронах. В представляемой работе приведены результаты исследования свойств одномодовых гауссовых и бесселевых пучков, в том числе, «вращающихся пучков» или пучков с топологическим зарядом [2], полученных с помощью элементов дифракционной компьютерной оптики из освещающего пучка мощного терагерцового лазера. Создание элементов, формирующих одномодовые лазерные пучки терагерцового диапазона, позволит решать такие прикладные и фундаментальные задачи, как управление протяженным газовым разрядом, создание эффективных лазерных радарных систем (лидаров) терагерцового диапазона, и повышение информационной емкости перспективных телекоммуникационных систем терагерцового диапазона.

### Литература

- [1] А. Н. Агафонов, Б. О. Володкин, А. К. Кавеев, Б. А. Князев, Г. И. Кропотов, В. С. Павельев, В. А. Сойфер, К. Н. Тукмаков, Е. В. Цыганкова, Ю. Ю. Чопорова, Автометрия 49 2 (2013).
- [2] Дифракционная компьютерная оптика под ред. В.А. Сойфера, Физматлит, М. 2007.
- [3] А.Н. Агафонов, Б.О. Володкин, А.К. Кавеев, Д.Г. Качалов, Б.А. Князев, Г.И. Кропотов, К.Н. Тукмаков, В.С. [Павельев](#), Д.И. Цыпишка, Ю.Ю. Чопорова, Компьютерная оптика 39 1 (2015).
- [4] A.N. Agafonov, Yu.Yu. Choporova, A.V. Kaveev, B.A. Knyazev, G.I. Kropotov, V.S. Paveyev, K.N. Tukmakov, B.O. Volodkin, Applied Optics 54 12 (2015).

## Terahertz Detectors Based on Plasma Oscillations in Nanometer Field Effect Transistors

W.Knap<sup>1,2</sup>, D. But<sup>1</sup>, N.Dyakonova<sup>1</sup>, D.Coquillat<sup>1</sup>, M.Vitiello<sup>3</sup>, S. D. Ganichev<sup>4</sup>, M.Sypek<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Charles Coulomb Laboratory, CNRS & Montpellier University, Montpellier (France)

<sup>2</sup> High Pressure Institute Polish Academy of Sciences Warsaw (Poland)

<sup>3</sup> NEST, Istituto Nanoscienze - CNR and Scuola Normale Superiore Pisa (Italy)

<sup>4</sup> Terahertz Center, University of Regensburg, Regensburg, 93040, (Germany)

<sup>5</sup> Optical Information Processing Laboratory, Warsaw University of Technology, (Poland)

*E-mail: knap@univ-montp2.fr*

We present an overview of some recent results concerning THz detection related to plasma nonlinearities in nanometer field effect transistors [1,2]. The subjects were selected in a way to show physics related limitations and advantages rather than purely technological or engineering improvements of nanometer. Field Effect transistors (FETs) working as Terahertz detectors. We address the basic physics related problems like temperature dependence, of the response [3], helicity sensitive detection [4] and nonlinear/saturation response at high incident power [5].

We present also the results on graphene based THz detectors [6,7]. The results will be discussed in view of the physical and technical limitations of Field Effect Transistors based THz detectors. The first real world application for linear scanners for postal security will be presented [8].

### References

- [1] W. Knap and M. I. Dyakonov, 'Field effect transistors for terahertz applications' in D. Saeedkia, Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications, Cambridge, Woodhead Publishing, 121-155, (2013).
- [2] W Knap, et al, Nanotechnology, 24 (2013)
- [3] O.Klimenko et al, J. Appl. Phys, 112, 014506 (2012)
- [4] C.Drexler et al, J. Appl. Phys., 111, 124504 (2012)
- [5] D.But et al, J.Appl. Phys., 115, 164514 (2014)
- [6] J Vicarelli , et al., Nature Materials 11 (10), 865-871 (2012).
- [7] J Muraviev et al, Appl. Phys. Lett. 103 (18), 181114 (2013). ...
- [8] J. Suszek et al, Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions 5 (2), 314 (2015).

## Эффективная генерация терагерцового излучения в периодическом массиве полупроводниковых нитевидных нанокристаллах на основе GaAs

А.Д. Буравлев<sup>1,3</sup>, И.А. Мустафин<sup>1,2</sup>, **В.Н. Трухин**<sup>1,2</sup>, Г.Э. Цырлин<sup>1,3</sup>, J.P. Kakko<sup>4</sup>,  
T. Huhtio<sup>4</sup>, H. Lipsanen<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

<sup>2</sup>НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., 49

<sup>3</sup>СПб АУ РАН, Санкт-Петербург, 194021, ул. Хлопина, 8

<sup>4</sup>Micronova, Aalto University, P.O. Box 13500, FI-000a76 Aalto, Finland

тел: (812) 292-79-36, факс: (812) 297-10-17, эл. почта: [valera.truchin@mail.ioffe.ru](mailto:valera.truchin@mail.ioffe.ru)

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования генерации ТГц излучения в периодическом массиве полупроводниковых нитевидных нанокристаллов (ННК) на основе GaAs, синтезированных методом ГФЭМО, и в объемном полупроводнике p-InAs при возбуждении сверхкороткими оптическими импульсами фемтосекундной длительности.

Экспериментально было определено, что эффективность ТГц генерации определяется фактором заполнения ННК и достигает максимума при значении расстояния между нанопроводами порядка длины волны возбуждающего света. Было показано, что подобная зависимость обусловлена резонансным поглощением света в нанокристаллах и ближнепольным взаимодействием возбужденных нанокристаллов. В рамках теории Лоренца-Ми было вычислено сечение поглощения света при наклонном падении на полупроводниковый нанокристалл. Рассчитанная зависимость эффективности поглощения света от величины  $kr$  имеет резонансный характер, соответствующий резонансам Ми ( $k$  – волновой вектор возбуждающей электромагнитной волны,  $r$  – радиус ННК). Кроме того, для величины  $kr = 0.63$  ( $r = 80$  нм) поглощение света при угле падения  $45^\circ$  примерно в два раза больше для ТЕ поляризации по сравнению с ТМ поляризацией, а при  $kr = 0.31$  ( $r = 40$  нм) наблюдается противоположная картина. Это согласуется с экспериментальными результатами и подтверждает, что значение ТГц поля напрямую связано с эффективностью поглощения света [1]. Эффективность терагерцовой генерации в GaAs ННК, синтезированных на подложке n-GaAs и имеющих оптимальные геометрические параметры, превышает аналогичную величину для объемного p-InAs, являющегося наиболее эффективным когерентным терагерцовым эмиттером [2]. Таким образом, полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что эффективность ТГц генерации определяется процессом возбуждения цилиндрических вытекающих мод при падении света на полупроводниковый нанокристалл и возрастает за счёт резонансного возбуждения мод Ми. Максимальное значение ТГц поля достигается при значении расстояния между ННК порядка длины волны возбуждающего света, а также при соответствующих значениях диаметра ННК.

### Литература

[1] V. N. Trukhin, A. V. Andrianov, N. N. Zinov`ev, Phys. Rev. B 78, 155325 (2008).

[2] R. Adomavičius, A. Urbanowicz, G. Molis, A. Krotkus, E. Satkovskis, Appl. Phys. Lett. 85, 2463 (2004).

## Оптоэлектронные системы терагерцового и субтерагерцового диапазонов частот электромагнитного излучения

С.А. Кузнецов<sup>1,2</sup>, А.Г. Паулиш<sup>1,2</sup>, В.Н. Федоринин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, 630090, просп. Лаврентьева 2/1

<sup>2</sup> НГУ, Новосибирск, 630090, Пирогова 2

тел: (383) 316-5910, факс: (383) 330-9106, эл. почта: paulish63@ngs.ru

Доклад посвящен использованию терагерцового (ТГц) и субтерагерцового (субТГц) излучения для построения оптоэлектронных систем различного назначения. Проведен анализ частотной области ТГц диапазона с точки зрения решения задач обнаружения и распознавания скрытых объектов. Рассматриваются вопросы создания систем радиовидения и систем дистанционного спектрального анализа объектов.

Для решения задач радиовидения ТГц (субТГц) диапазоне в Филиале, совместно с НГУ, разработана система получения изображения, основанная на конверсии ТГц излучения в инфракрасное (тепловое) излучение. Конвертер ТГц излучения в ИК представляет собой многослойную структуру, состоящую из ультратонкого резонансного поглотителя на основе метаматериала, и эмиссионного слоя с коэффициентом черноты в ИК-диапазоне близким к единице. Резонансное поглощение ТГц излучения на заданной длине волны, с коэффициентом поглощения близким к 100%, приводит к нагреву поглотителя и увеличению интенсивности ИК-излучения со стороны эмиссионного слоя. Регистрация ИК-излучения осуществляется высокочувствительной ИК камерой. Ключевой особенностью поглощающей метаструктуры является малость ее толщины  $d$  по сравнению с рабочей длиной волны  $\lambda$  ТГц излучения, что позволяет обеспечить низкую теплоемкость и, тем самым, высокую чувствительность и быстрое действие болометрического детектора. На сегодня экспериментально продемонстрирована возможность достижения отношений  $\lambda/d \sim 220$ . Приводятся результаты моделирования предельных параметров визуализатора: минимальной обнаруживаемой мощности ТГц излучения, времени отклика детектора и других параметров. Приведены результаты экспериментальных исследований визуализатора.

Другим направлением разработок является создание одиночного, линейчатого и матричного приемника ТГц излучения на основе пироэлектрического приемника, совмещенного с ультратонким резонансным поглотителем. Пленка поглотителя размещена непосредственно на пироэлектрической пленке, что обеспечивает непосредственную передачу тепла от поглотителя в пироприемник. Исследования созданных образцов показали, что пироприемник с ТГц-поглотителем обладает примерно такой же чувствительностью в ТГц диапазоне, что и пироприемник без поглотителя в ИК диапазоне. Предварительные результаты показали, что чувствительность к излучению с длиной волны 2 мм составляет около 5000 В/Вт, а полоса пропускания до 1000 Гц.

В докладе приводятся результаты разработки квазиоптических элементов для управления терагерцовым излучением: фильтров, поглотителей, преобразователей фазы, фокусирующих элементов (плоских линз).

## Уровни захвата и терагерцовые фотоэффекты в PbSnTe:In

А.Э. Климов<sup>1</sup>, В.В. Кубарев<sup>2</sup>, В.Н. Шумский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 11  
тел: (383) 330-7883, факс: (383) 333-2771, эл. почта: klimov@isp.nsc.ru

Проанализированы результаты исследований выращенных методом МЛЭ монокристаллических пленок  $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$  с  $x \approx 0,24-0,3$ , для которых при  $T=4,2K$  без освещения наблюдается высокоомное состояние ( $\rho \leq 10^8$  Ом-см). Проводимость и ВАХ (Рис. 1) определялись инжекцией из контактов и токами, ограниченными пространственным зарядом при наличии центров захвата. Анализ ВАХ позволяет

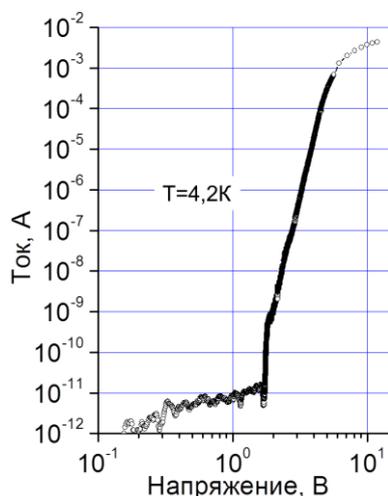


Рис. 1. ВАХ PbSnTe:In. Расстояние между контактами 0,0064 см, длина зазора 0,15 см.

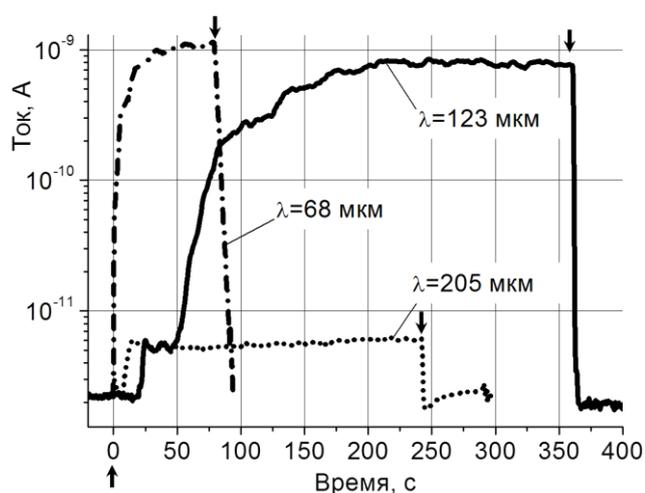


Рис. 2. Временные зависимости тока. «Включение» (↑) и «выключение» (↓) лазера на свободных электронах.  $T=4,2K$ .

оценить энергии ионизации уровней захвата, которые создают в запрещенной зоне PbSnTe:In непрерывный или квазинепрерывный спектр, соответствующий  $\lambda \approx 600-120$  мкм или менее [1]. Это хорошо согласуется с данными по терагерцовой чувствительности PbSnTe:In [2], а также с результатами авторов, полученных с использованием излучения лазера на свободных электронах (Рис. 2). Приводятся данные по различной динамике нарастания и спада фотосигнала в зависимости от длины волны и условий измерений (напряженности электрического и магнитного полей, наличия или отсутствия фоновой подсветки), которые также качественно согласуются с представлениями о сложном спектре уровней захвата в PbSnTe:In. Рассматривается возможная природа возникновения такого спектра, основанная на случайном распределении атомов в металлической подрешетке, принципиально присущем твердым растворам, к которым относится и PbSnTe:In. Приводятся оценки возможности использования оптических переходов с таких уровней в фотоприемниках и фотоприемных устройствах терагерцового диапазона длин волн.

### Литература

[1] Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов, УФН **184**, 1033 (2014).

[2] А.Е. Klimov, V.N. Shumsky, Physica B **404**, 5028 (2009).

## Терагерцовое зондирование поверхностных состояний в топологических изоляторах

С. Г. Егорова<sup>1</sup>, А. В. Галеева<sup>1</sup>, В. И. Черничкин<sup>1</sup>, Л. И. Рябова<sup>2</sup>, Е. П. Скипетров<sup>1</sup>, М. Е. Тамм<sup>2</sup>,  
Л. В. Яшина<sup>2</sup>, С. Н. Данилов<sup>3</sup>, С. Д. Ганичев<sup>3</sup>, Д. Р. Хохлов<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Физический факультет Московского государственного университета имени  
М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр.2, Москва, 119991, Россия.

<sup>2</sup>Химический факультет Московского государственного университета имени  
М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр.2, Москва, 119991, Россия.

<sup>3</sup>Faculty of Physics, University of Regensburg, Universitaetstrasse 33, Regensburg,  
D-93053, Germany.

<sup>4</sup>Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп.,  
53, Москва, 119991, Россия.

тел: (495)939-11-51, факс: (495)932-88-76, эл. почта: [khokhlov@mig.phys.msu.ru](mailto:khokhlov@mig.phys.msu.ru)

В работе предложен метод детектирования протяженных поверхностных электронных состояний, включая топологические. Метод основан на измерениях фотоэлектромагнитного эффекта с использованием импульсного терагерцового лазерного излучения. В отличие от обычных транспортных измерений, метод нечувствителен к объемной проводимости.

В качестве объекта исследований выбраны твердые растворы  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  и  $(Bi_{1-y}In_y)_2Se_3$ . Диапазон составов  $x$  включал как в область прямого ( $x < 0.15$  и  $y > 0.06$ ), так и инверсного ( $x > 0.15$  и  $y < 0.06$ ) спектра. В области составов, соответствующих инверсному спектру, рассматриваемые полупроводники являются топологическими изоляторами. Для исследования использовался метод, позволяющий анализировать характер диффузионных потоков, направленных от поверхности в объем полупроводника, при возбуждении носителей импульсами терагерцового лазера с длиной волны 90 и 148 мкм и с длительностью около 100 нс в условиях приложенного магнитного поля до 7 Тл. Температура образца изменялась от 4.2 до 20 К. Диффузионный поток возникал вследствие теплового возбуждения носителей в приповерхностном слое. Вектор магнитного поля, направленный перпендикулярно потоку падающего излучения, обеспечивал отклонение диффундирующих носителей в направлении силы Лоренца, создавая разность потенциалов, знак и напряженность которой зависят от направления и скорости диффузионного потока и приложенного магнитного поля.

Показано, что протяженные поверхностные электронные состояния присутствуют в  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  как в области прямого, так и инверсного энергетического спектра. Таким образом, продемонстрировано, что даже в случае, когда наличие топологических состояний подтверждено экспериментами по ARPES, наблюдение высокоподвижных поверхностных электронных состояний не означает, что данные состояния являются топологическими. Могут существовать другие поверхностные высокопроводящие состояния, которые «скрывают» топологические в транспортных экспериментах. В принципе, такие «скрывающиеся» высокопроводящие поверхностные состояния могут проявляться и в других транспортных измерениях. В этом случае единственным достоверным критерием, позволяющим приписать какой-то транспортный эффект влиянию топологических состояний, является наличие этого эффекта в образцах с инверсным спектром и его отсутствие в образцах с прямым спектром. Такому критерию удовлетворяют поверхностные состояния, обнаруженные в  $(Bi_{1-y}In_y)_2Se_3$ . – они наблюдаются лишь в области инверсного спектра.

## Фотолюминесцентная характеристика эпитаксиальных слоев твердых растворов CdHgTe

К. Д. Мынбаев<sup>1,2</sup>, Н. Л. Баженов<sup>1</sup>, Н. Н. Михайлов<sup>3</sup>, М. В. Якушев<sup>3</sup>,  
В. С. Варавин<sup>3</sup>, С. А. Дворецкий<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия

<sup>3</sup>ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, ул. ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630909, Россия  
тел: (812)292-71-82, факс: (812)292-10-17, эл. почта: [mynkad@mail.ioffe.ru](mailto:mynkad@mail.ioffe.ru)

Исследования дефектов в твердых растворах HgCdTe приобрели особую актуальность с развитием технологии выращивания эпитаксиальных слоев на подложках, «альтернативных» традиционным подложкам из CdTe и CdZnTe. В условиях гетероэпитаксии велика вероятность формирования специфических как структурных, так и точечных дефектов, и эти дефекты могут оказать значительное влияние на параметры конечного фотоприемного устройства. В этой связи всестороннее изучение дефектной структуры гетероэпитаксиальных слоев, где с помощью оптических методов зачастую возможно получить уникальную информацию, приобретает особое значение. Фотолюминесцентные методы применялись для исследования HgCdTe с 70-х годов XX века, но именно в последнее время стали важным инструментом материаловедения этих твердых растворов [1–4]. В докладе будут представлены последние результаты фотолюминесцентных исследований, проведенных на гетероэпитаксиальных слоях HgCdTe, выращенных молекулярно–лучевой эпитаксией (МЛЭ) на подложках из Si и GaAs в ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН. Особое внимание будет уделено анализу двух ключевых особенностей этих слоев, проявляющихся в оптических исследованиях, — масштабу разупорядочения твердого раствора, выращиваемого МЛЭ, и специфике дефектной структуры материала, выращиваемого на разных подложках (Si и GaAs). Для анализа влияния разупорядочения на свойства эпитаксиальных слоев будут подробно рассмотрены особенности низко– (температура 4,2 К) и высоко– (300 К) температурной фотолюминесценции образцов HgCdTe, выращенных МЛЭ; эти результаты будут сопоставлены с аналогичными данными, полученными на образцах, выращенных жидкофазной эпитаксией. Будут представлены уточненные методики расчета скоростей излучательной и безызлучательной рекомбинации в HgCdTe, учитывающие непараболичность зонной структуры этого материала, также будет обсуждена модель рекомбинации в полупроводниковых твердых растворах с масштабным разупорядочением. Данные о специфических дефектах в слоях HgCdTe, синтезированных на подложках GaAs и Si при разных условиях выращивания и пост–ростовой обработки, полученные фотолюминесцентными методами, будут сопоставлены с результатами исследований температурных зависимостей времени жизни носителей заряда и измерений электрических параметров материала.

### Литература

- [1] S.V.Morozov, V.V.Rumyantsev, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 072102 (2014).
- [2] F.Gemain, I.C.Robin, S. Brochen, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **102**, 142104 (2013).
- [3] X.H.Zhang, J.Shao, L.Chen, X.Lu, *et al.*, J. Appl. Phys. **110**, 043503 (2011).
- [4] К.Д.Мынбаев, Н.Л.Баженов, В.И.Иванов-Омский и др., ФТП **45**, 900 (2011).

## Светоизлучающие нанокристаллы Si, Ge и GeSi в различных матрицах: формирование, структурные и оптические свойства

В.А. Володин<sup>1,2</sup>, М.П. Гамбарян<sup>1,3</sup>, Г.К. Кривякин<sup>1,3</sup>, Г.Н. Камаев<sup>1</sup>, С.А. Кочубей<sup>1</sup>,  
А.Г. Черков<sup>1,3</sup>, В.И. Вдовин<sup>1,3</sup>, М. Vergnat<sup>4</sup>, J. Stuchlik<sup>5</sup>, А.В. Двуреченский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников СО РАН, пр. академика Лаврентьева, 13,  
Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2,  
Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет, пр. К.Маркса, 20,  
Новосибирск, 630073, Россия

<sup>4</sup>Université de Lorraine, Institut Jean Lamour UMR CNRS 7198, B.P. 70239, 54506  
Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France

<sup>5</sup>Institute of Physics ASCR, v. v. i., Cukrovarnická 10/112, 162 00 Praha 6, Czech Republic  
тел: (383)333-24-70, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [volodin@isp.nsc.ru](mailto:volodin@isp.nsc.ru)

Нанокристаллы (НК) кремния и германия в диэлектрических плёнках, интересны как с фундаментальной точки зрения (квантовые точки), так и для применения в нано- и оптоэлектронике.

Были исследованы НК Si, Ge в матрицах a-Si:H, SiO<sub>x</sub>, SiN<sub>x</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученные различными способами – со-испарением и осаждением на подложку мишеней Ge и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, плазмохимическими методами, импульсными лазерными отжигами (ИЛО). НК GeSi были получены путём отжига многослойных нано-структур GeO/SiO<sub>2</sub>, закрытых защитным слоем SiO<sub>2</sub> (100 нм) [1]. Образцы исследовали методами ИК- спектроскопии, электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), фотолюминесценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ).

Была обнаружена интенсивная ФЛ в видимой и ближней ИК спектральных областях от НК Ge в матрице Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Обнаружено, что в многослойных структурах GeO/SiO<sub>2</sub>, после отжигов слои SiO<sub>2</sub> и GeO перемешиваются, и образуется стекло Ge<sub>x</sub>Si<sub>y</sub>O<sub>z</sub>, содержащее НК GeSi, их размер и состав зависят от параметров отжига. Образование НК GeSi ведёт к появлению ФЛ в ИК- диапазоне, наблюдаются пики с положением от 0.9 до 0.65 эВ. Была исследована температурная зависимость интенсивности пиков ФЛ, обнаружено, что она не является зависимостью вида Аррениуса  $\exp(-T_a/T)$ . Предполагается, что НК могут представлять собой структуру Ge ядро и оболочка GeSi.

В p-i-n структурах на основе a-Si:H были с применением ИЛО сформированы НК Si в нелегированной области. Обнаружен сигнал ЭЛ в ИК- диапазоне от p-i-n структур с НК Si, положение пика (0.9-1 эВ) варьировалось с параметрами ИЛО, по-видимому вследствие изменения средних размеров НК и растягивающих деформаций в них. Оценка размеров НК проводилась из анализа спектров КРС с использованием улучшенной модели локализации фононов [2].

Итак, структуры содержащие НК Si, Ge и GeSi имеют перспективы для создания светоизлучающих диодов видимого и ИК- диапазона на их основе.

### Литература

[1] V.A. Volodin et. al., J. Phys. D: Appl. Phys. **46** 275305, (2013).

[2] В.А.Володин, В.А. Сачков, ЖЭТФ **143** 100, (2013).

## Гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками Ge для фотоприемников среднего ИК-диапазона

А. А. Блошкин<sup>1,2</sup>, А. И. Якимов<sup>1</sup>, В. В. Кириенко<sup>1</sup>, В. А. Тимофеев<sup>1</sup>, В. А. Армбристер<sup>1</sup>,  
А. В. Двуреченский<sup>1,2</sup>, А.И. Никифоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090,  
пр. академика Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2  
тел: (383) 333-2832, факс: (383) 333-2832, эл. почта: *bloshkin@isp.nsc.ru*

Представлен обзор исследований фотоэлектрических характеристик гетероструктур Ge/SiGe/Si, содержащих слои квантовых точек (КТ) Ge в матрицах Si и SiGe. Механизм фототовета в окнах прозрачности атмосферы 3-5 и 8-12 мкм связан с оптическими переходами дырок из связанных состояний в КТ в состояния континуума валентной зоны полупроводниковой матрицы.

Фотодетекторы представляли собой вертикальные  $p+-p-p+$ -диоды со встроенными в  $p$ -область слоями КТ Ge, разделенными либо промежутками Si, либо SiGe и заключенными между двумя сильно легированными контактными слоями  $p$ -типа. В экспериментах варьировался элементный состав плёнок SiGe и его профиль, уровни и профили легирования, положение легированных слоев Si и SiGe соответственно. На основании проведенных исследований реализованы инфракрасные фотоприемные элементы, функционирующие при нормальном падении света в окнах прозрачности атмосферы 3-5 и 8-12 мкм.

Фотодетекторы, выполненные на основе гетероструктур Ge/Si, характеризуются высокими (до  $10^3$ ) фотоэлектрическим усилением, обнаружительной способностью в фотовольтаическом и фотопроводящем режимах (до  $0.8 \cdot 10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт на длине волны 4 мкм), уровнем чувствительности по току до 1 мА/Вт, работают в режиме ограничения флуктуациями фонового излучения уже при температуре 110 К и способны встраиваться в монокристаллические матрицы фокальной плоскости на кремниевых подложках.

Для получения фотоотклика в длинноволновом окне пропускания атмосферы были реализованы детекторы, представляющие собой десять слоев квантовых точек Ge, встроенные в матрицы релаксированного твердого раствора  $Si_{1-x}Ge_x$  ( $x = 0.3-0.4$ ). Для уменьшения плотности дислокаций в слоях  $Si_{1-x}Ge_x$  использовался метод обратно градиентных виртуальных подложек в сочетании с низкотемпературным ростом. Фотоприемники Ge/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> работают в фотовольтаическом режиме при  $x < 0.4$ . Спектральная полоса фотоотклика структур с  $x=0.3$  покрывает диапазон длин волн фотонов от 1 до 7 мкм с максимумом чувствительности в области 4.3 мкм. Величина обнаружительной способности в фотовольтаическом режиме составила  $2 \cdot 10^{10}$  см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт на длине волны 4.3 мкм при температуре детектора 90 К. Фотоприемники на виртуальной подложке с содержанием Ge  $x=0.4$  характеризуются широкой спектральной полосой чувствительности вплоть до 12 мкм и работают в обоих окнах прозрачности атмосферы 3-5 и 8-12 мкм. Отношение чувствительности в среднем и дальнем атмосферных окнах контролируются прикладываемым напряжением и может варьироваться в пределах двух порядков.

## Многослойные поляризаторы ИК-диапазона большой площади

А.Е.Гайдук, С.Н.Речкунов, В.А.Селезнёв, Е.А.Злобина, В.Я.Принц  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090,  
Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.  
тел: (383)333-06-99, эл. почта: [aegayduk@isp.nsc.ru](mailto:aegayduk@isp.nsc.ru)

Поляризационные фотометрические измерения позволяют улучшить контрастность изображений и подавить паразитные сигналы, упрощая распознавание объектов (в том числе замаскированных), поскольку материалы и структура поверхности объектов влияют на поляризацию отраженного света. В настоящей работе изготовлены образцы двухслойного и четырехслойного поляризаторов на основе субволновых металл-диэлектрических решеток и исследованы их оптические свойства. Нанорешеточные поляризаторы обладают высоким коэффициентом пропускания, высоким соотношением экстинкции и могут быть легко интегрированы в фотоприемные устройства. Одной из главных задач в этой области является создание поляризаторов большой площади, превышающих размер апертуры матриц фотоприемников.

Структуры изготавливались с помощью наностамповой литографии с последующей металлизацией. Площадь образцов составила 180 см<sup>2</sup> при периоде структуры 190 нм и глубине рельефа 155 нм. Измерения на атомно-силовом микроскопе показали, что параметры рельефа воспроизводятся по всему образцу с высокой точностью. Четырехслойная сэндвич-структура была реализована путем бондинга двух двухслойных решеток через слой фоторезиста (SU-8) толщиной 400 нм (рис. 1а). Изготовленная структура является гибкой и защищена от внешних воздействий полимерными слоями. Спектры прохождения, полученные в эксперименте показали, что при длине волны света 700 нм и более происходит подавление ТЕ-волны. Коэффициент пропускания ТМ-волны превысил 0.7 для двухслойного и 0.5 для четырехслойного поляризаторов в ближнем инфракрасном диапазоне (рис. 1б). Коэффициент экстинкции (отношение интенсивностей прошедших ТМ и ТЕ-волн) на длине волны 1550 нм составил 34 дБ и 45 дБ для двухслойной и четырехслойной структур, соответственно.

В области 540-650 нм коэффициент прохождения ТМ-волны близок к нулю, в то время как ТЕ-волна частично проходит через структуру. Именно в этой области спектра ТМ-

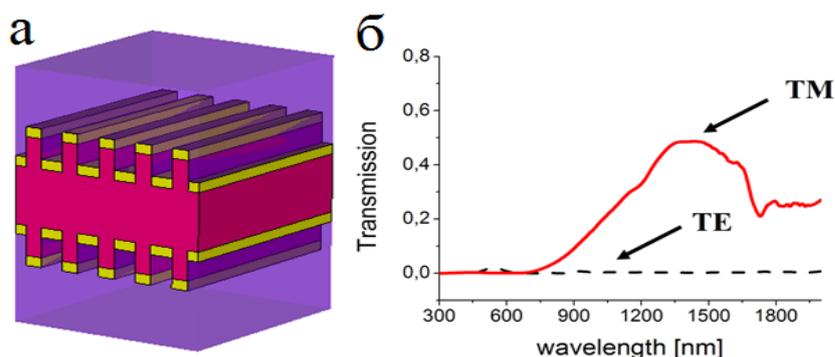


Рис.1. а) схематичное изображение четырехслойного поляризатора, сформированного из двух двухслойных. б) экспериментальные спектры пропускания четырехслойного поляризатора.

волна возбуждает в золотых полосках локализованный плазмонный резонанс, что приводит к поглощению света и проявляется в виде провала в спектре прохождения. Оптические свойства поляризаторов были промоделированы численно методом конечных интегрирований, получено хорошее согласование с экспериментом.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-29-10261.

## Воздействие мощного импульсного ИК излучения на свойства гетероэпитаксиальных структур HgCdTe

А. В. Войцеховский<sup>1</sup>, Н. Х. Талипов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет, Томск, 634050, пр. Ленина, 36

тел: (913)101-0077, эл. почта: [vav43@mail.tsu.ru](mailto:vav43@mail.tsu.ru)

<sup>2</sup> Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, Москва, 109074, Китайгородский проезд, 9

Облучение мощными импульсами лазерного ИК-излучения поверхности  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (КРТ) относится к виду радиационного воздействия, при котором поглощение сильно сконцентрированной в пространстве и времени энергии электромагнитной волны приводит к возникновению целого каскада процессов преобразования энергии, приводящим к изменениям электрофизических и оптических свойства свойств материала, модификации поверхности. В докладе рассматриваются результаты исследования нелинейного поглощения мощного импульсного ИК-излучения  $\text{CO}_2$ -лазера ( $\lambda = 9,47$  мкм), радиационной модификации поверхности гетероэпитаксиальных слоев КРТ, выращенных методом МЛЭ (ГЭС КРТ МЛЭ) и ЖФЭ (ЖФЭ КРТ)  $p$ - и  $n$ -типа проводимости и пространственному распределению дефектов акцепторной природы, генерированных при воздействии мощного импульсного ИК-излучения твердотельного  $\text{YAG/Nd}^{3+}$ -лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм) и химического DF-лазера ( $\lambda = 3,8\text{--}4,2$  мкм).

Для экспериментов использовались структуры ГЭС КРТ МЛЭ, выращенные в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) на подложках GaAs, и ЖФЭ КРТ, выращенные в ГИРЕДМЕТе (г. Москва) на подложках CdZnTe. Облучение образцов КРТ лазерными импульсами ИК-излучения проводилось в широком интервале интенсивностей от 0,25 до 20 МВт/см<sup>2</sup>. Облученные образцы исследовались методами дифференциального эффекта Холла, ИК-отражения и пропускания, оптической микроскопии и профилометрии, электронной спектроскопии для химического анализа.

Были получены следующие основные результаты: (1) облучение ГЭС КРТ МЛЭ мощными импульсами  $\text{CO}_2$ -лазера при  $T = 78$  К в области фундаментального поглощения приводит к просветлению образца вследствие увеличения температуры рабочего слоя. Построена модель мощного импульсного ИК-лазерного воздействия на ГЭС КРТ МЛЭ с учетом эффекта просветления; (2) основными дефектами, генерируемыми импульсами ИК-излучения мощностью выше пороговой ( $P_{\text{пор.}} = 1,5$  МВт/см<sup>2</sup>) в поглощающем слое ГЭС КРТ МЛЭ, являются вакансии ртути  $V_{\text{Hg}}$ , приводящие к формированию поверхностного сильнолегированного  $p^+$ -слоя, как в материале  $n$ -типа, так и  $p$ -типа, пространственное распределение генерируемых  $V_{\text{Hg}}$  зависит от интенсивности и длины волны лазерного излучения; (3) воздействие мощного импульсного лазерного ИК-излучения на ГЭС КРТ МЛЭ и ЖФЭ КРТ приводит к обогащению приповерхностных слоев атомами ртути, генерации термоупругих напряжений с элементами механического повреждения целостности слоев, сублимации и деградации поверхности; (4) облучение  $\text{YAG/Nd}^{3+}$ -лазером имплантированного ионами  $\text{B}^+$  ГЭС КРТ МЛЭ приводит к отжигу радиационных донорных дефектов и электрической активации внедренных атомов бора в результате плавления и рекристаллизации облученного поверхностного слоя; (5) при мощном импульсном облучении  $\text{YAG/Nd}^{3+}$ - и DF-лазеров ГЭС КРТ МЛЭ вблизи границы облученной и необлученной областей ГЭС КРТ МЛЭ формируется поверхностная периодическая структура. Период структуры коррелирует с длиной волны излучения лазеров.

## Влияние температуры роста на структурные и оптические свойства сверхрешеток GaSb/InAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Е. А. Емельянов<sup>1</sup>, А. В. Васев<sup>1</sup>, М. А. Путято<sup>1</sup>, И. Б. Чистохин<sup>1</sup>, В. В. Румянцев<sup>2</sup>,  
С. В. Морозов<sup>2</sup>, Б. Р. Семягин<sup>1</sup>, А. П. Василенко<sup>1</sup>, А. К. Гутаковский<sup>1</sup>,  
**В. В. Преображенский<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> ИФМ РАН, Нижний Новгород, 603950, ГСП-105

тел: (383)333-19-676, факс: (383)333-35-02, эл. почта: pvv@isp.nsc.ru

Напряженные короткопериодные сверхрешетки II типа (НКСП) InAs/GaSb являются перспективным материалом для создания нового поколения высокоэффективных инфракрасных фотоприемников. Эффективная ширина запрещенной зоны таких НКСП может варьироваться от 0,04 до 0,4 эВ (30-3 мкм) при изменении лишь толщины составляющих их слоев, что позволяет создавать на их основе фотодетекторы, перекрывающие весь ИК диапазон.

Ключевая роль в реализации оптических свойств НКСП принадлежит гетерограницам GaSb/InAs, т.к. состав прилегающих к границе раздела слоев определяет остаточные механические напряжения в сверхрешетке. К настоящему времени высокоэффективные ИК-фотодетекторы на НКСП GaSb/InAs изготовлены только на структурах, выращенных методом МЛЭ. Преимуществом метода МЛЭ, по сравнению с другими методами эпитаксии, является более низкая температура проведения процесса выращивания ( $T_s$ ) в сочетании с возможностью резко менять состав поступающих к поверхности компонентов роста. Это дает возможность формировать резкие по составу границы между слоями в сверхрешетке.

Пониженная  $T_s$  с одной стороны позволяет подавить процессы диффузии и сегрегации при росте и формировать заданный состав слоев, прилегающих к границам раздела. С другой стороны, слишком низкая  $T_s$  приводит к формированию собственных точечных дефектов в слоях НКСП, что определяет ухудшение параметров фотодетектора. Поэтому оптимизация  $T_s$  НКСП является важной технологической задачей. С этой целью была выращена серия сверхрешеток  $[(\text{GaSb})_8 / (\text{InAs})_8]_{50}$  на подложках GaSb(001) при различных  $T_s$  (430, 400, 385, 355°C) все остальные параметры роста оставались постоянными.

Выращивание образцов НКСП GaSb/InAs проводилось на установках МЛЭ "Катунь" с использованием потока молекул Ga, In и Sb<sub>4</sub>, формируемых из тигельных источников, и As<sub>4</sub>, формируемого из вентильного источника.

Были проведены исследования структурных, оптических и фотоэлектрических свойств выращенных образцов методами рентгеновской дифрактометрии, высокоразрешающей электронной микроскопии, низкотемпературной фотолюминесценции и латеральной спектральной фотопроводимости. Полученные результаты выявили однозначную корреляцию свойств НКСП с  $T_s$ . Лучшими характеристиками обладали образцы НКСП, выращенные при  $T_s = 385^\circ\text{C}$ . Обсуждаются механизмы влияния  $T_s$  на их свойства.

## Туннельная спектроскопия электронных состояний в гетерокомпозициях InAs/GaAs с массивами квантовых точек

Л.К. Орлов, Н.С. Волкова, М.Л. Орлов, Т.О. Мищенко  
ИФМ РАН, ННГУ, НГТУ, Н.Новгород,  
[orlov@ipm.sci-nnov.ru](mailto:orlov@ipm.sci-nnov.ru)

Работа посвящена применению метода туннельной фотоэлектронной спектроскопии для анализа свойств квантово-размерных структур, выращенных методом МОС - гидридной эпитаксии и содержащих в окрестности приповерхностного потенциала ансамбль квантовых точек [1]. Цель данной работы заключалась в исследовании электрополевого поведения резонансных особенностей, наблюдаемых на фотоэлектрических характеристиках InAs/GaAs гетерокомпозиций [2] и выявлении механизма туннельной эмиссии из квантовых точек InAs возбуждаемых светом носителей заряда в матрицу GaAs. Путем сопоставления данных фотоэлектрических измерений и проводимых модельных расчетов, продемонстрировано хорошее согласие наблюдаемых характеристик с моделью, включающей туннельные переходы электронов между собственными уровнями квантовой точки и континуума состояний в GaAs. Показано, что присутствие сильного электрического поля оказывает определяющее влияние на величину фототока вследствие туннелирования электронов через барьер. Сопоставление экспериментальных кривых с квазиклассическим выражением для туннельной составляющей тока не только подтвердило вывод о доминирующей роли в сильных полях туннельного эффекта, но и позволило уточнить некоторые значения параметров структуры и обнаружить присутствие резонансной составляющей, связанной с туннелированием электронов через барьер с участием локальных уровней на гетерогранице. Ранее возможность появления резонансных состояний в барьере на гетерогранице обсуждалась нами только на гетерокомпозициях InGaAs/InAlAs [3] и Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> [4] с квантовыми InGaAs и Si ямами.

### Литература

- [1] Б. Н. Звонков, И. А. Карпович, и др. // ФТП, **35**(1), 92 (2001).
- [2] Н. С. Волкова, А. П. Горшков, и др. // Письма в ЖЭТФ, **100**(3), 175 (2014).
- [3] М.Л. Орлов, Л.К. Орлов. // ФТП, **43**(5), 679 (2009).
- [4] М.Л. Орлов, Ж. Хорват, и др. / ФТП, **56** (7), 970 (2014).

## Релаксация и долговременная стабильность МЛЭ CdHgTe $n^+ - n$ -структур, сформированных ионным травлением

И. И. Ижнин<sup>1,2</sup>, Е. И. Фицич<sup>1</sup>, А. В. Войцеховский<sup>2</sup>, А. Г. Коротаев<sup>2</sup>,  
А. Ю. Бончик<sup>3</sup>, Г. В. Савицкий<sup>3</sup>, В. С. Варавин<sup>4</sup>, С. А. Дворецкий<sup>4</sup>,  
Н. Н. Михайлов<sup>4</sup>, М. В. Якушев<sup>4</sup>, К. Д. Мынбаев<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup> Научно-производственное предприятие “Карат”, Львов, 79031, Стрийская, 202

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Томск, 634050, Ленина, 36

<sup>3</sup> ИППММ им. Я.С. Пидстригача НАН Украины, Львов, 79060, Научная 36

<sup>4</sup> ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, ак. Лаврентьева, 13

<sup>5</sup> ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, 194021, Политехническая, 26

<sup>6</sup> Университет ИТМО С.-Петербург, 197101, Кронверкский пр-кт, 49

тел: (032) 263-1065, факс: (032) 294-9735, эл. почта: i.izhnin@carat.electron.ua

Ионное травление (ИТ) является одним из методов формирования  $n^+ - n - p$  переходов фотодиодов в вакансионно-легированном и легированном As CdHgTe (КРТ)  $p$ -типа проводимости. Кроме этого, ИТ оказалось эффективным способом исследования дефектной структуры КРТ. В процессе ИТ в приповерхностной области КРТ формируется источник неравновесной междоузельной ртути ( $Hg_I$ ) с чрезвычайно высокой концентрацией. Это предопределяет полную аннигиляцию вакансий ртути и приводит к формированию в модифицированном (конвертируемом) слое донорных центров и комплексов с наиболее известными для КРТ акцепторными примесями (As, Sb, Cu, Ag и Au) и определенными структурными нейтральными дефектами (предположительно, наноконкомплексами теллура). После окончания процесса ИТ наблюдается выраженная релаксация (изменение) электрических параметров модифицированного (или конвертированного) слоя в течении  $10^3 - 10^5$  мин в процессе хранения образцов при комнатной температуре, что связано с распадом сформированных донорных комплексов. Данный факт требовал проведения специальных исследований по долговременной (5-10 лет) стабильности параметров структур КРТ, созданных при помощи ИТ.

Для исследований были использованы образцы эпитаксиальных структур (ЭС) КРТ, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках (013) GaAs и Si, как номинально нелегированные, так и легированные As,  $n$  и  $p$  типа проводимости после роста и после термических отжигов для получения вакансионно-легированного КРТ или активации акцепторной примеси As. Проведенные экспериментальные исследования впервые позволили количественно доказать, что стабилизация параметров  $n^+ - n$  структур (концентрация и подвижность электронов основного объема модифицированного  $n$ -слоя), сформированных ИТ в КРТ, происходит уже на стадии кратковременной релаксации (порядка 200000 мин). Параметры остаются постоянными на протяжении долговременной (больше 7 лет) выдержки, что подтверждает пригодность метода ионного травления для формирования стабильных  $p - n$  переходов фотодиодов на основе КРТ. Кроме того, показано, что распад донорных комплексов  $Hg_I$  с As проходит через образование нейтральных центров, которые являются стабильными в течение 10 лет при хранении при комнатной температуре. Это позволяет определять концентрацию донорного фона в КРТ уже после кратковременной релаксации не только в содержащих вакансии образцах  $p$ -КРТ, но и легированных акцепторной примесью As.

## Ионно-лучевой синтез и свойства нанокристаллов InSb в структурах кремний-на-изоляторе

И. Е. Тыщенко<sup>1</sup>, Л. Л. Дзюбина<sup>1</sup>, А. Г. Черков<sup>2</sup>, В.А. Володин<sup>1,2</sup>, В. П. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьквa, 13

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Пирогова 2  
тел: (383) 333-2493, факс: (383) 333-2771, эл. почта: [tys@isp.nsc.ru](mailto:tys@isp.nsc.ru)

Разработка методов создания источников света, эффективно излучающих в видимом (0.4 – 0.8 мкм) и инфракрасном (1.3 – 1.6 мкм) спектральных диапазонах, с целью передачи информации внутри электрических цепей, является одной из наиболее перспективных задач фотоники. Осуществление оптической связи на кремнии видится в формировании гетероструктур  $A_3B_5$ -Si. Большинство материалов  $A_3B_5$  имеет большое несоответствие кристаллических решеток с решеткой Si (от 4 до 18%), что снижает структурное качество формируемых структур и ведет к деградации их оптических свойств. Решение этой проблемы может быть достигнуто в процессе ионного синтеза квантовых точек полупроводников  $A_3B_5$  или слоев нанометровой толщины. Целью данной работы было изучение закономерностей ионно-лучевого синтеза и свойств нанокристаллов InSb в структурах кремний-на-изоляторе (КНИ). Особенность ионного синтеза фазы InSb в оксиде кремния заключается в большом различии коэффициентов диффузии атомов In и Sb. В наших экспериментах синтез нанокристаллов изучался как функция температуры отжига в интервале 500-1100° С в КНИ структурах с захороненным слоем SiO<sub>2</sub>, имплантированным ионами In и Sb.

Установлено, что формирование нанокристаллов InSb происходит, начиная с температуры 900° С, когда диффузионная длина атомов Sb становится сопоставимой со средним расстоянием между внедренными атомами. Размеры нанокристаллов и их стехиометрический состав неоднородны по глубине слоя SiO<sub>2</sub>. Методом высокоразрешающей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показано, что нанокристаллы со стехиометрическим составом InSb и максимальным размером около 26 нм (при температуре 1000° С) сосредоточены в области средних пробегов ионов, а за областью средних пробегов нанокристаллы не имеют строго кристаллической структуры и в их составе преобладает индий. Полученные результаты объяснены с точки зрения различия коэффициентов диффузии атомов индия и атомов сурьмы при указанной температуре в 15 раз.

Методом комбинационного рассеяния света обнаружены высокочастотные сдвиги положения пиков рассеяния на частоте поперечного и продольного оптического фонона в синтезированных структурах относительно их значений в монокристаллическом антимониде индия на ~6 см<sup>-1</sup>. Наблюдаемые сдвиги указывают на наличие напряжений сжатия в синтезированных нанокристаллах. На основе полученных данных сделано предположение о том, что формирование фазы InSb происходит через расплав растущего зародыша.

## Метод эллипсометрии в технологии процессов молекулярно-лучевой эпитаксии кадмий-ртуть-теллура

В.А. Швец<sup>1,2</sup>, Е.В. Спесивцев<sup>1</sup>, И.А. Азаров<sup>1</sup>, С.В. Рыхлицкий<sup>1</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>1</sup>,  
М.В. Якушев<sup>1</sup>, В.Д. Кузьмин<sup>1</sup>, Ю.Г. Сидоров<sup>1</sup>, С.А. Дворецкий<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090,  
проспект Академика Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090,  
г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>3</sup> Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
тел: (383) 330-8716, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [shvets@isp.nsc.ru](mailto:shvets@isp.nsc.ru)

Кадмий-ртуть-теллур (КРТ) является одним из перспективных материалов для создания ИК фотоприёмников и излучателей дальнего и сверхдальнего диапазонов спектра. Широкий диапазон обеспечивается изменением состава соединения  $X_{\text{CdTe}}$  – доли CdTe в материале. Лидирующее место при выращивании гетероэпитаксиальных слоёв КРТ занимает молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Метод МЛЭ позволяет создавать структуры высокого кристаллического совершенства на подложках из Si, Ge, GaAs, выращивать слои переменного состава, создавать слоистые структуры с заданными свойствами, включая квантовые структуры. Для реализации всех перечисленных возможностей требуется надёжный метод технологического *in situ* контроля при выращивании структур.

В ИФП СО РАН в течение последних десятилетий для этих целей используется метод лазерной (одноволновой) эллипсометрии. В отличие от электронных методов контроля он не воздействует на процессы роста, которые в технологии МЛЭ КРТ происходят при относительно низких температурах  $\sim 200^\circ\text{C}$ . Для решения широкого круга задач, возникающих при реализации эллипсометрического контроля, разработаны специальные эллипсометры, которыми оснащены все модули, используемые на разных этапах выращивания гетероструктур КРТ. Используя накопленный опыт и обширный эмпирический материал, нами были разработаны эллипсометрические методики, с помощью которых можно проводить контроль процессов очистки подложки GaAs, измерять скорость роста и структурное качество буферных слоёв ZnTe и CdTe, измерять температуру образцов в условиях высокого вакуума и, наконец, контролировать с высокой точностью один из ключевых параметров технологии КРТ – состав соединения  $X_{\text{CdTe}}$ .

В основе эллипсометрического метода определения состава лежит зависимость оптических постоянных от  $X_{\text{CdTe}}$ , которая проявляется наиболее сильно на длин волн HeNe лазера. Для прецизионного измерения состава в процессе роста необходимо выполнение двух условий: (1) наличие воспроизводимой технологии эпитаксии КРТ и (2) возможность проведения высокоточных эллипсометрических измерений. Для реализации этой задачи был разработан и изготовлен высокостабильный эллипсометр, стендовые испытания которого показали, что разброс параметра  $\Psi$ , чувствительного к изменению состава, в течение нескольких часов измерений остаётся в пределах  $0.01^\circ$ . На модулях эпитаксии КРТ, оснащённых высокоточными эллипсометрами, удалось в несколько раз повысить точность попадания в заданный состав. Из многочисленных экспериментов по выращиванию слоёв КРТ установлено среднеквадратичное отклонение от целевого состава 0.002 молярные доли CdTe.

## Дислокации в гетероэпитаксиальных структурах CdHgTe на подложках ориентации (013) и возможности снижения их плотности

Ю.Г.Сидоров, В.С.Варавин, Е.М.Труханов, И.В.Сабина, И.Д.Лошкарев,  
**А.В.Колесников**, М.В.Якушев

Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 13,  
Новосибирск, 630090, Россия

тел: (383)333-10-89, факс: (383)333-10-89, эл. почта: [kolesn@isp.nsc.ru](mailto:kolesn@isp.nsc.ru)

Изготовление гетероструктур с высокой разностью параметров кристаллических решеток сопрягаемых материалов и низкой плотностью прорастающих дислокаций является важнейшей задачей полупроводникового материаловедения.

Обнаружено различие дислокационной структуры буферных пленок CdTe(013), выращенных на подложках из арсенида галлия и кремния. Плотность дислокаций, определяемая как плотность ямок травления (EPD), в буферных пленках CdTe(013) при толщине 6-7 мкм спадает до  $10^7$  см<sup>-2</sup> при росте на Si и до  $10^6$  см<sup>-2</sup> при росте на GaAs. По данным рентгеновской дифрактометрии разворот эпитаксиальных слоев CdTe относительно подложки связан с формированием сетки дислокаций несоответствия (ДН) на гетерогранице с подложкой. При использовании подложек Si величина разворота не превышает 1.5 градусов, а для подложек GaAs угол разворота может достигать 4.5 градусов.

При осаждении CdHgTe (КРТ) на буферном слое теллурида кадмия также формируется сетка дислокаций несоответствия большой плотности, несмотря на небольшое рассогласование параметров решеток. В результате на границе КРТ с буферным слоем CdTe плотность прорастающих дислокаций превышает величину  $10^8$  см<sup>-2</sup>, которая при толщине 6-8 мкм спадает до  $10^7$  см<sup>-2</sup>. С помощью электронной микроскопии зарегистрированы Г-образные ДН, которые имеют одинаковые значения критических толщин для их введения и одинаковые векторы Бюргера, что облегчает аннигиляцию пронизывающих дислокаций.

Уменьшение плотности дислокаций за счет взаимодействия между ними может требовать введения или выведения материала (атомов, строящих кристаллическую решетку). С увеличением активности компонента вероятность его ввода в кристаллическую решетку растет, а с понижением – увеличивается вероятность выхода атомов компонента из решетки. Для бинарного соединения активности компонентов связаны константой равновесия  $K = a_{Te} \cdot a_{Me}$ , откуда следует, что одновременно создать оптимальные условия для всех процессов невозможно.

Наиболее эффективный процесс снижения плотности дислокаций может быть обеспечен при циклическом изменении температуры отжига при постоянном давлении паров ртути. Если в последовательности циклов отжига менять температуру образца КРТ от 300<sup>0</sup>С до 500<sup>0</sup>С, отношение  $a_{Te}/a_{Hg}$  будет меняться от 0,0027 при температуре образца 300<sup>0</sup>С до величины 38 при температуре образца 500<sup>0</sup>С, что обеспечит условия эффективного ввода и вывода атомов теллура и ртути. Циклический отжиг позволяет на порядок снизить плотность прорастающих дислокаций в верхнем слое пленки КРТ. Снижение плотности дислокаций подтверждается, как уменьшением плотности ямок травления, так и данными рентгеновской дифрактометрии. Полная ширина на полувысоте (ПШПВ) пика от слоя КРТ после роста равна 148 угл. с., после циклического отжига – 91 угл. с. в симметричном отражении (6 2 0).

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ RFMEFI60414X0134 и гранта РФФИ 14-02-00677-а.

## **Status of mid and long infrared detectors at Vigo System**

**A.Piotrowski**

VIGO System S.A., ul. Poznańska 129/133, 05-850 Ożarów Mazowiecki

*E-mail: [apiotrow@vigo.com.pl](mailto:apiotrow@vigo.com.pl)*

From the early 1970s group of scientists related to Military Academy of Technology worked on infrared (IR) detectors that required no cryogenic cooling. Expensive stirling coolers, inconvenient dewars were a limiting factor in wider spread of the detectors in wider range of applications systems, particularly those operating in the middle (MWIR) and long wavelength (LWIR) range of infrared spectrum. IR detectors with limited cooling have obvious advantages including the elimination of power consuming cryogenics, reduction of size, weight, and cost, and the increase reliability. The number of applications potentially affected by near room temperature IR detector technology is widespread including the following military applications: head-mounted thermal imagers, missile seeker sensors, interceptor sensors, integrated modules for weapon sights, sniper and threat detection, wide area surveillance thermal imagers, handheld camera and weapons sights, driving sensors for unmanned vehicles, enhanced imagers for vehicle drivers, and eye-safe laser range finders. This technology has also widespread civilian applications such as: sensitive heterodyne detection, fast pyrometry, Fourier and laser spectrophotometry, imaging interferometry, laser technology and metrology, long wavelength optical communication, new types of gas analyzers, imaging spectrophotometers, non-destructive material testing and many others. We present here a history and status of the developments and products manufactured at VIGO. The devices have been optimized for any wavelength within the 3 to 16  $\mu\text{m}$  spectral range when operating at ambient temperature or with rugged Peltier coolers. Due to heterostructural design of active elements, optical immersion and other solutions the devices can obtain S/N performance close to the fundamental limits and sub-nanosecond response time. State-of-the-art material growth, processing techniques and integration with related electronics will be described.

## МФПУ на основе эпитаксиальных структур антимонида индия

И.Д. Бурлаков<sup>1</sup>, **К.О. Болтарь**<sup>1</sup>, П.В. Власов<sup>1</sup>, А.А. Лопухин<sup>1</sup>, В.А. Соловьев<sup>2</sup>,  
А.Н. Семенов<sup>2</sup>, Б.Я. Мельцер<sup>2</sup>, Т.А. Комиссарова<sup>2</sup>, Т.В. Львова<sup>2</sup>, С.В. Иванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион», РФ, Москва, ул. Косинская, д. 9, 111538

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,

Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, 194021

тел: (499) 374-9400, 374 9401, факс: (499) 373-6862, эл. почта: orion@orion-ir.ru

Одним из перспективных направлений улучшения характеристик матричных фотоприемных устройств (МФПУ) является использование гомоэпитаксиальных структур антимонида индия на сильнолегированной подложке.

Нелегированный активный слой выращивается методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках  $n^+$ -InSb, а  $p$ -слой формируется имплантацией ионов  $Be^+$  [1]. При проведении гомоэпитаксии InSb методом МПЭ одной из ключевых проблем является сложность удаления слоя естественных оксидов с поверхности подложки InSb. Для предэпитаксиальной подготовки подложек  $n^+$ -InSb (001) используется методика обработки поверхности в водном растворе  $Na_2S$ , позволяющая получить атомарно-гладкую поверхность, свободную от оксидов сурьмы и индия [2].

Для изготовления матриц фотодиодов формата 320x256 элементов с шагом 30 мкм на основе полученных эпитаксиальных структур используется меза-технология с глубиной разделения элементов  $\sim 1$  мкм. Матрицы фоточувствительных элементов гибридируются индиевыми микроконтактами с БИС считывания формата 320x256 элементов. Проведено исследование фотоэлектрических характеристик фотоприемников при 80 К.

Среднее значение эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) при относительном отверстии 1:1 на кадровой частоте 100 Гц составляет 12 мК, что соответствует ЭШРТ МФПУ на объемном антимониде индия. Коротковолновая граница фоточувствительности обусловлена поглощением в подложке и составляет 3,1 мкм, длинноволновая граница – 5,2 мкм. На первых образцах МФПУ, изготовленных на эпитаксиальных слоях антимонида индия, количество работоспособных элементов достигало 99,5%.

Показана перспективность применения гомоэпитаксиальных слоев антимонида индия на сильнолегированной подложке для матричных фотоприемных устройств средневолнового ИК-диапазона.

### Литература

[1] Болтарь К.О., Киселева Л.В., Лопухин А.А., Савостин А.В. Способ изготовления матричного фотоприемника // Патент № 2460174, (2012).

[2] T. V. L'vova, M.S. Dunaevskii, M. V. Lebedev, A.L. Shakhmin, I. V. Sedova, and S. V. Ivanov, Semiconductors, **47**, 5 (2013), с.721.

## Матричные фотоприемники на основе квантовых ям GaAs/AlGaAs форматом 384×288 и 640×512

Д. Г. Есаев, А. П. Савченко, В. А. Фатеев, И. В. Марчишин, М. А. Демьяненко,  
А. И. Торопов, А. К. Калагин, Н. А. Валишева, Н. Р. Вицина  
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090,  
пр. акад. Лаврентьева, 13  
тел: (383)330-9029, факс: (383)333-2771, эл. почта: [esaev@isp.nsc.ru](mailto:esaev@isp.nsc.ru)

Приведены результаты разработки технологии изготовления фотоприемных матриц на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ) для спектрального диапазона 8-10 мкм размерностью 384×288 и 640×512 элементов, с размером пикселя 25 и 20 мкм соответственно. Фоточувствительные структуры изготавливались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на установке "Сомпакт 21Т". Фоточувствительный слой состоял из 30 периодов квантовых ям GaAs и барьеров  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x=0.26-27$ ). С обеих сторон фоточувствительного слоя изготавливались проводящие контакты из GaAs:Si толщиной 1 мкм. Концентрация Si в проводящих контактных слоях составляла  $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а в квантово-размерных слоях GaAs выбиралась в пределах  $3-7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что близко к оптимальной концентрации для МСКЯ фоторезисторов.

В процессе разработки технологии изготовления фоточувствительных матриц с пониженным до 20 мкм размером пикселя ранее применяемое нами жидкостное химическое травление было заменено на плазмохимическое травление. Высокая кадровая частота (120 и 100 Гц соответственно для матриц форматом 384×288 и 640×512), малая апертура (1/2) и стремление повысить рабочую температуру до 70-73 К требуют проведения дополнительных мер по повышению квантовой эффективности.

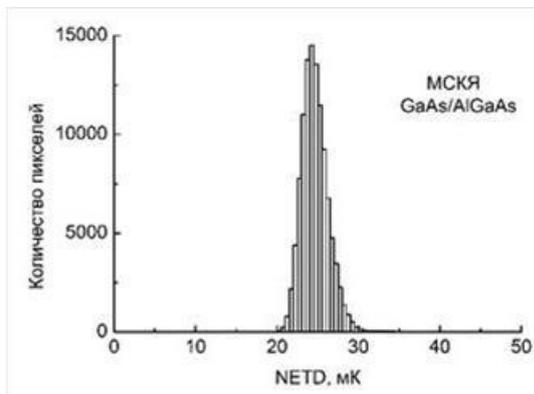


Рис. 1. Тепловое изображение и гистограмма NETD для фотоприемного модуля форматом 384×288.

Пример теплового изображения и гистограмма распределения эквивалентной шуму разности температур (NETD) по элементам фотоприемного модуля форматом 384×288 показаны на рисунке 1. Средние значения NETD при времени интегрирования равном 8 и 6 мс для приемников форматом 384×288 и 640×512 соответственно составило 25 и 32 мК при температуре приемника 65 К и апертуре 1/2. Количество дефектных элементов, имеющих NETD более 70 мК, составляло менее 0,5 %.

## Новое поколение ИК фотоприемников на основе КРТ, работающих при повышенных температурах

В.М.Базовкин<sup>1</sup>, Н.А.Валишева<sup>1</sup>, В.С.Варавин<sup>1</sup>, В.В.Васильев<sup>1</sup>, В.М. Гайлес<sup>2</sup>, А.А.Гузов<sup>1</sup>,  
С.А.Дворецкий<sup>1</sup>, А.П.Ковчавцев<sup>1</sup>, И.И.Ли<sup>1</sup>, Д.В.Марин<sup>1</sup>, Ю.С.Макаров<sup>1</sup>,  
В.Г.Половинкин<sup>1</sup>, И.В.Сабина<sup>1</sup>, Ю.Г.Сидоров<sup>1</sup>, Г.Ю.Сидоров<sup>1</sup>,  
Д.В.Фромичев<sup>2</sup>, А.В.Царенко<sup>1</sup>, **М.В.Якушев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090,  
пр. ак. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> АО “НПП “Восток”, Новосибирск, 630049, ул. Дуси Ковальчук, 276

Одной из важных задач современной микрофотоэлектроники является повышение рабочей температуры охлаждаемых фотовольтаических ИК-детекторов относительно температуры жидкого азота. Более высокая рабочая температура позволяет снижать размер, вес, энергопотребление фотоприемников (ФП) и расширить диапазон их применения.

Для снижения величины темнового тока и соответственного повышения рабочей температуры фоточувствительных элементов в настоящее время проводится переход к использованию многослойных гетероструктур КРТ с базовым слоем n-типа проводимости, легированного внешними примесями (мышьяком и индием). Расположение р-области в широкозонной части гетероструктуры и использование примесей, не являющихся центрами рекомбинации, приводит к заметному снижению темнового тока, что позволяет повысить рабочую температуру диодов.

На основе гетероэпитаксиальных структур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с варизонными слоями, выращенных методом МЛЭ и легированных  $\text{In}$  с концентрацией  $(1-5)\times 10^{15}\text{ см}^{-3}$  ионной имплантацией мышьяка с последующей активацией атомов мышьяка температурным отжигом изготовлены и измерены матрицы фотодиодов. Температурные зависимости токов обратно смещенные диодов матриц лимитировались диффузией неосновных носителей тока, а величины токов были почти на 2 порядка меньше чем у диодов на основе вакансионного КРТ.

Из сравнения экспериментальных и теоретических зависимостей токов была определена концентрация глубоких уровней  $\sim 5\cdot 10^{11}\text{ см}^{-3}$ . Теоретические зависимости были получены в рамках одномерной диффузионно-дрейфовой модели. Численным моделированием определено оптимальное расположение металлургической границы р-n перехода в контактном слое и значение концентрации индия в поглощающем слое.

Изготовлены гибридные матричные ИКФП формата  $320\times 256$  с  $\lambda_{1/2}(170\text{K}) = 3.0\text{ мкм}$ . Значения NETD и  $D^*$  при 170 К составили менее 40 мК и более  $2\cdot 10^{12}\text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2}\cdot\text{Вт}^{-1}$  (комнатный фон с  $\theta/2 = 32$ , полоса 40 Гц).

Впервые в России изготовлены гибридные матричные ИКФП формата  $1024\times 1024$  с  $\lambda_{1/2}(170\text{K}) = 3.0\text{ мкм}$ . Фотоэлектрические параметры элементов матрицы измерялись с помощью ИК пятна диаметром 30 мкм с концентрацией энергии в пятне 40% (диапроектор ИКД-2). При вольтовой чувствительности  $\sim 1,3\cdot 10^{11}\text{ В/Вт}$  величина  $D^*$  при 170 К в максимуме гистограммы составляла  $\sim 8\cdot 10^{11}\text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2}\cdot\text{Вт}^{-1}$ .

Изготовлены гибридные матричные ИКФП формата  $320\times 256$  с  $\lambda_{1/2}(80\text{K}) = 5.2\text{ мкм}$ . Величина  $D^*$  в максимуме гистограммы при 85 К составляла  $1.6\cdot 10^{11}\text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2}\cdot\text{Вт}^{-1}$  в полосе  $3.8\cdot 10^3\text{ Гц}$ . Величина NETD составляет  $\sim 17\text{ мК}$  (температуры наблюдаемого объекта  $\sim 30\text{ C}$ ).

# Создание матричных фотоприемников на основе ГЭС КРТ МЛЭ на длины волн 3-5 и 8-10 мкм форматом до 1024x1024

Г.Ю. Сидоров, И.В. Сабина, В.В. Васильев, Ю.Г. Сидоров  
И.В. Марчишин, А.В. Предеин, М.В. Якушев, В.М. Базовкин, В.Г. Половинкин  
Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В.Ржанова, Новосибирск, 630090,  
Пр. Ак. Лаврентьева 13

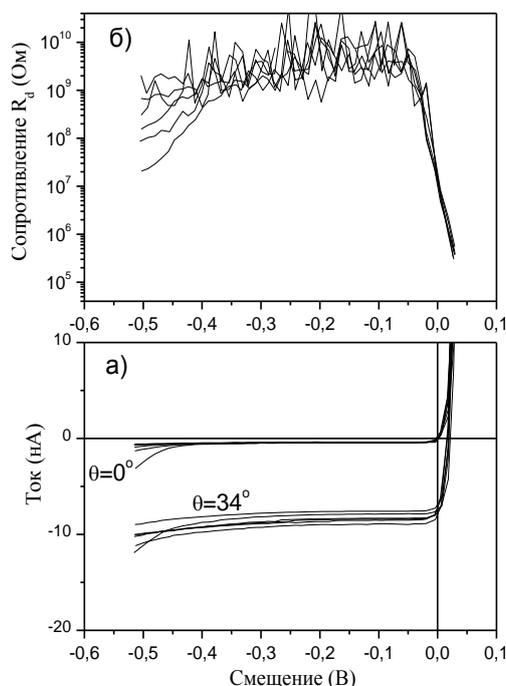
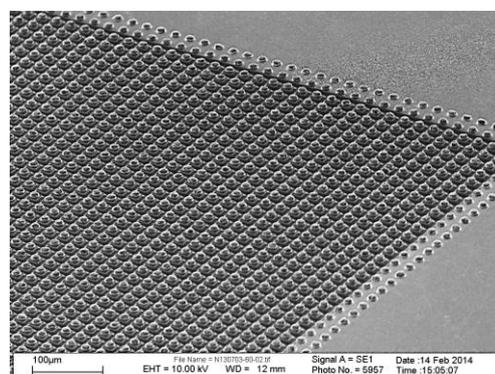
В работе представлена информация об усовершенствованиях технологии изготовления матричных ФПУ форматов 320x256, 640x512 с шагом 25 и 20 мкм, на основе ГЭС КРТ МЛЭ новой архитектуры, выращенных как на GaAs так и на Si подложках, которые позволили уменьшить темновые токи и неоднородность параметров фотодиодов по площади ФПУ, значительно понизить количество дефектов, возникающих при гибридизации ФПУ. Впервые в России изготовлены МФПУ формата 1024x1024 на подложках из кремния на диапазон 3-5 мкм. Приводятся параметры изготовленных матриц.

Высокие фототоки диодов чувствительных в диапазоне 8-10 мкм могут приводить к существенному падению напряжения смещения на диодах от центра к общему контакту матрицы при использовании *n* на *p* архитектуры. Для снижения  $\Delta U$  до величин менее 50 мВ в ГЭС КРТ был добавлен высоколегированный подслой *n*-типа, с сопротивлением  $\rho_{sn}=10 \text{ Ом}/\square$ .

Для улучшения ВАХ фотодиодов и повышения однородности их параметров помимо усовершенствования самих ГЭС КРТ МЛЭ были проведены не только глобальные изменения архитектуры самих ФПУ – такие как переход на меза-технологии (рис.1), но и оптимизация многочисленных параметров технологической цепочки производства ФПУ. Для пассивации поверхности МФПУ изготовленного по новой технологии был применен новый диэлектрик – оксид алюминия, выращенный методом атомно-слоевого осаждения. Помимо пассивации границы раздела переход на новую технологию нанесения диэлектрика также позволил повысить однородность характеристик диодов по площади подложек. На рис.2 показаны вольт-амперные характеристики *n* на *p* диодов в матрице с шагом 20 мкм и краем поглощения  $\lambda_{1/2} = 10 \text{ мкм}$ , при 77К, без излучения (темновые ВАХ) и с засветкой фоном с  $T_B = 293 \text{ К}$  и  $\theta = 34^\circ$ .

Были разработаны первые образцы матриц на диапазон 3-5 мкм с диодами *p* на *n* форматов 320x256 и 1024x1024 на основе ГЭС КРТ на подложках из кремния, где *p* слой получен легированием мышьяком, а *n*-слой – индием.

За счет оптимизации параметров алгоритма гибридизации (давления и температуры) и введения ряда дополнительных усовершенствований, удалось практически полностью избавиться от возникновения дефектных элементов вследствие неравномерного сдавливания. Благодаря усовершенствованию технологии гибридизации стало возможным изготовление матриц формата 1024x1024.



## Thin films of PECVD silicon nitride for nanophotonic application

O.I. Semenova<sup>1</sup>, N.A. Yeryukov<sup>1</sup>, Zhiyong Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, 630090, Lavrent'ev pr., 13

<sup>2</sup> Institute of Semiconductors CAS, Beijing, China

*tel: (383) 330-8591, fax: (383) 333-2771, e-mail: oisem@isp.nsc.ru*

Thin films of hydrogenated silicon nitride fabricated by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) have been widely used in semiconductor industry. In the past decade the application of silicon nitride thin films has been extended to silicon nanophotonics [1]. The ultimate goal of silicon photonics is the integration of individual photonic devices with microelectronic devices that enables high-performance, cost-effective optical communication and computing systems.

The optical properties of c-Si are relatively poor, owing to its indirect band gap which precludes the efficient emission and absorption of light. The inversion symmetry of silicon crystal prohibits the existence of linear electro-optic effect. It was shown experimentally and theoretically by S.V. Govorkov [2], that the symmetry can be broken by applying inhomogeneous stress in Si surface layers. Now semiconductor industry has adopted several different technologies to introduce strain in Si channel of MOSFETs. One approach involves the use of a strain-inducing capping layer. PECVD silicon nitride is a common choice for a strained capping layer, in that the magnitude and type of strain (e.g. tensile vs. compressive) may be adjusted by modulating the deposition conditions. Now this idea helps to realized all-silicon electro-optic modulator based on a strain induced Pockels effect in silicon. In [3] Mach-Zehnder modulator based on a locally strained waveguide structure is presented. Authors use a silicon nitride strain layer deposited directly on top of silicon rib-waveguide.

Hydrogenated amorphous silicon nitride films (SiN<sub>x</sub>:H) have been deposited at low temperature by high-frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (HF PECVD). Information on chemical bonds in the films was obtained by FTIR. The stress in the SiN<sub>x</sub>:H films was determined from substrate curvature measurements. It was shown that plasma frequency play an important role in the controlling the stresses in SiN<sub>x</sub>:H films. For silicon nitride layers grown at plasma frequency 40.68 MHz initial tensile stresses were observed in the range of 400 – 700 MPa. Measurements the intrinsic stresses of silicon nitride films have shown that stresses quantity is sufficient for application films in strained silicon photonics.

We present the fabrication procedure for silicon waveguide with strained silicon nitride films deposited on top of waveguide. Stress in the silicon waveguide induced by SiN<sub>x</sub> layer was estimated by the frequency shift of the Si phonon mode by means of micro-Raman spectroscopy. For this purpose the Si waveguide was monitored by Raman microscope before and after SiN<sub>x</sub> deposition at the laser excitation power about 0.1 μW in order to prevent the heating effect. The characteristics of fabricated device were studied.

This work was partially supported by RFBR grant № 14-03-91154 NNSF

- [1] C. Schriever et al. Strained Silicon Photonics. *Materials*, **5**, 889 (2012).
- [2] S.V. Govorkov et al. *J. Opt. Soc. Am. B* **6**, 1117 (1989).
- [3] R.S. Jacobsen et al. *Nature*, **441**, 199 (2006).

## Радиофотоника: прошлое, настоящее, будущее

Ю. Н. Вольхин

ОАО "ЦКБА", Россия, 644027, г. Омск, Космический проспект, дом 24-А,  
тел. (3812) 53-79-76, факс (3812) 57-19-84, эл. почта: [ckba@omsknet.ru](mailto:ckba@omsknet.ru)

В настоящий момент радиофотоника (или микроволновая фотоника - Microwave photonic) окончательно оформилась в достаточно самостоятельный раздел науки и техники, в рамках которого исследуются взаимодействия оптических и высокочастотных электрических полей (сигналов, волн), а также создаются технические устройства, принцип работы которых основан на таких взаимодействиях [1].

Научно-технические "истоки" радиофотоники - на уровне реальных технических устройств - отчётливо прослеживаются со второй половины 19-го века, но фактически современная радиофотоника возникла на рубеже 20-21-го веков как некий "побочный" продукт в процессе бурного и "инвестиционно-привлекательного" процесса развития всё более высокоскоростных, и как следствие, всё более широкополосных - с полосой пропускания до десятков гигагерц и более - волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП).

В настоящий момент основной областью применения методов и средств радиофотоники является аналоговая обработка сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, которая осуществляется при помощи различных сверхширокополосных радиофотонных аналоговых процессоров: умножителей частоты, фазовых манипуляторов, детекторов и смесителей, устройств частотной селекции.

Также методы и средства радиофотоники активно применяются для создания высокочастотных генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн с рекордными характеристиками по спектру, а также сверхширокополосных АЦП с диапазонами рабочих частот до сотни гигагерц и выше.

Сверхзадачей современной полупроводниковой промышленности является создание элементной базы для полупроводниковой радиофотоники.

### *Литература*

- [1] А.А.Белоусов, Ю.Н.Вольхин Ю.Н., А.В.Гамиловская, А.А.Дубровская, Е.В.Тихонов. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.//Прикладная фотоника, 2014 г., №1 - Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. - 2014.

## Мощный высокоскоростной фотодиод Шоттки для устройств и систем радиопhotоники

С. А. Малышев<sup>1</sup>, А. Л. Чиж<sup>1</sup>, К. Б. Микитчук<sup>1</sup>, А. А. Тептеев<sup>2</sup>, А. С. Шуленков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики НАН Беларуси, Минск, 220072, пр. Независимости 68

<sup>2</sup> ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», Минск, 220024, ул. Кижеватова 86

тел: (+375 17) 281-2213, факс: (+375 17) 281-2213, эл. почта: [malyshev@ieee.org](mailto:malyshev@ieee.org)

В распределенных удаленных антенных системах радиосвязи, радиолокационных системах с фазированными антенными решетками, а также в измерительной СВЧ-технике перспективно использование волоконно-оптических линий передачи СВЧ-сигналов, так как они имеют очень низкие потери, небольшой вес и размер, а также невосприимчивы к электромагнитным помехам [1,2]. В аналоговых волоконно-оптических линиях с широким линейным динамическим диапазоном требуются мощные высокоскоростные фотодиоды на основе гетероструктур InGaAs/InP, работающие в спектральном диапазоне 1260–1675 нм, в котором оптическое волокно имеет минимальные потери [3].

В данной работе представлена новая конструкция мощного высокоскоростного фотодиода, представляющий собой InAlAs/InGaAs/InP фотодиод Шоттки, в котором контакт Шоттки и n-контакт изготовлены в виде металлических балок. Фотодиодная структура содержит меза-структуру круглого сечения с диаметром рабочей площадки 20 мкм и прямоугольные Au балочные выводы. В таком фотодиоде барьерный контакт Шоттки покрывает всю фоточувствительную область, поэтому рассматриваемый фотодиод имеет меньшее контактное сопротивление по сравнению с фотодиодом с традиционным кольцевым контактом, имеющим отверстие по центру для ввода оптического излучения. Более того, в фотодиоде с балочными выводами при его освещении со стороны контактного  $n^+$ -слоя металлический контакт Шоттки представляет собой зеркало для падающего оптического излучения, что значительно увеличивает эффективную длину поглощения в СВЧ-фотодиодах, имеющих тонкий поглощающий слой. Такая конструкция обладает низким тепловым сопротивлением, так как отвод тепла из области пространственного заряда фотодиода происходит через оба контакта. Благодаря использованию балочных выводов фотодиод может быть непосредственно смонтирован на микрополосковую или копланарную СВЧ-линию передачи. Максимальная выходная СВЧ-мощность экспериментальных образцов фотодиода Шоттки составила величину 15 дБм на частоте 20 ГГц, что позволяет использовать такие фотодиоды в аналоговых волоконно-оптических линиях с широким линейным динамическим диапазоном, а также для генерации СВЧ-сигналов оптическими методами в системах радиолокации, радиосвязи и измерительной СВЧ-техники.

### Литература

- [1] T. Berceli, P. Herczfeld, IEEE Trans. Microw. Theory Tech, V.58, №11 (2010)
- [2] A.J. Seeds, K.J. Williams, J. Lightwave Technology, V.24, №12 (2006).
- [3] V.J. Urick [et al.], IEEE Int. Topical Meeting on Microwave Photonics, (2008).

## **Высокоскоростные оптические модуляторы на основе нелинейно-оптических полимеров**

**А.И. Плеханов**

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, 630090,  
пр. Академика Коптюга, 1  
*тел (383) 3333-174, факс: (383) 330-88-78*

В последние годы электрооптические полимеры привлекают значительное внимание для изготовления различных оптических устройств в области телекоммуникаций. Они демонстрируют значительные преимущества по сравнению с традиционными оптическими материалами и могут быть использованы для получения высокопроизводительных, дешевых устройств, таких как электрооптические модуляторы, регулируемые оптические аттенюаторы и перестраиваемые фильтры.

Полимерные оптические устройства могут быть изготовлены из тонкопленочной многослойной структуры, содержащей подложку (стекло, кремний и т.д.), нижний электрод (золото и т.д.), центральный волноводный слой выполнен из полимера, обладающего большим показателем преломления, чем у слоев верхней и нижней обкладок и второй электрод.

Несмотря на то, что в настоящее время ниобат лития является доминирующим материалом для электрооптических модуляторов, которые имеют полосу пропускания около 10-70 ГГц с  $V_{\pi} \sim 5-6$  В и низкие вносимые потери (0,5-5 дБ), модуляторы на основе электрооптических полимеров имеют много потенциальных преимуществ. Полимерные модуляторы могут достичь очень высокой ширины полосы 100-200 ГГц на уровне -3 дБ в силу близости показателя преломления полимера на оптических и миллиметровых длинах волн. Электрооптические полимеры имеют низкую относительную диэлектрическую проницаемость, что позволяет интегрировать отдельные высокоскоростные модуляторы близко друг к другу без значительных перекрестных помех. Эта особенность допускает возможность создания интегрированных оптических чипов. Еще одним преимуществом полимерных электрооптических материалов является их значительно более низкое напряжение работы  $V_{\pi} \sim 5-6$  В.

В докладе будет представлен обзор современного состояния исследований в области электрооптических модуляторов.

# Увеличение мощности модуляции добротности в лазерах с квантовыми ямами под воздействием эффекта Штарка

И. М. Гаджиев<sup>1</sup>, М. С. Буяло<sup>1</sup>, Е. Л. Портной<sup>1</sup>

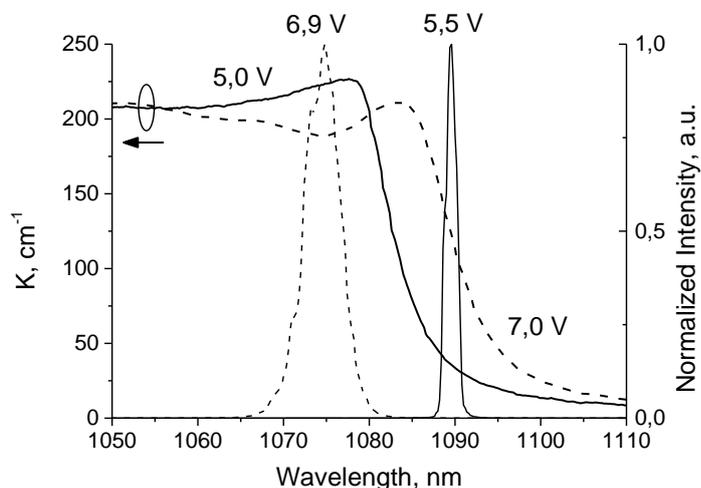
<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021,  
Политехническая, 26

тел: (812) 292-7376, факс: (812) 297-1017, эл. почта: [mikhail.buyalo@gmail.com](mailto:mikhail.buyalo@gmail.com)

В настоящей работе были исследованы лазеры с активной областью, содержащей три квантовые ямы (КЯ), излучающие короткие световые импульсы в режиме пассивной модуляции добротности (ПМД). Для реализации режима ПМД была выбрана двухсекционная конструкция лазеров, с монолитно-интегрированными секциями усиления и поглощения. Известно, что увеличить импульсную мощность в режиме ПМД можно за счет увеличения числа накопленных неравновесных носителей. В тоже время, в лазерах с КЯ из-за экситонного характера края зоны поглощения и эффекта сужения зон линия лазерной генерации находится на краю зоны поглощения, где поглощение мало [1], что ограничивает количество накопленных носителей. Поэтому, в настоящей работе, предлагается за счет штарковского сдвига края поглощения в длинноволновую область увеличить поглощение на длине волны лазерной генерации.

Методом МПЭ были изготовлены лазерные структуры, содержащие в активной области три InGaAs квантовые ямы, разделенные барьерами GaAs с толщиной 18 нм. Образцы лазеров с шириной полоска 5 мкм и длиной 0,6 мм были изготовлены методами стандартной фотолитографии.

Исследования лазеров проводились при различных токах накачки усиливающей секции и обратных смещениях  $V_{rev}$  на секции поглотителя; все измерения проводились при комнатной температуре. Режим ПМД наблюдался при  $V_{rev} > 4$  В, при этом характеристики импульсов ПМД меняются скачкообразно при увеличении  $V_{rev}$  более 6 В



разно при увеличении  $V_{rev}$  более 6 В - уменьшается длительность импульсов с 70 до 35 пс и растет мощность в импульсе более чем в два раза при том же токе накачки. Сопоставление спектров генерации со спектрами поглощения (см рис.), измеренными при близких значениях обратного смещения, показывает, что при  $V_{rev}$  менее 6 В линия генерации располагается на краю зоны поглощения. При превышении  $V_{rev}$  6 В линия генерации скачком смещается в коротковолновую область

и находится в спектральной области вблизи пика спектра поглощения, измеренном при том же обратном смещении. Сдвиг в коротковолновую область сопровождается увеличением поглощения на длине волны лазерной генерации с 35 до 190  $\text{cm}^{-1}$ , что приводит к росту числа накопленных неравновесных носителей и, соответственно, увеличению мощности импульсов ПМД.

## Литература

[1] Buyalo M. S., et al. // *El. Lett.* 2012. V. 48. I. 14. pp. 870-872.

## Волноводные и оптические характеристики эпитаксиальных структур GaN/InGaN – сапфир

М.Г. Кистенева<sup>1</sup>, М.В. Бородин<sup>1</sup>, В.В. Щербина<sup>1</sup>, С.М. Шандаров<sup>1</sup>, В.М. Шандаров<sup>1</sup>,  
А.С. Акрестина<sup>1</sup>, Е.С. Худякова<sup>1</sup>, В.М. Лисицын<sup>2</sup>, С.А. Степанов<sup>2</sup>, А.А. Колегов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Томск, 634050, пр. Ленина, 40

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, 634034, пр. Ленина, 30

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики  
им. У.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл., 456670, ул. Васильева, 13, а.я. 245  
тел: (3822) 413-887, факс: (3822) 51-32-62, эл. почта: [m-kisteneva@mail.ru](mailto:m-kisteneva@mail.ru)

В настоящем сообщении представлены результаты исследований волноводных свойств, а также спектров отражения и пропускания планарных гетероструктур GaN/InGaN, выращенных на сапфировых подложках и предназначенных для производства светоизлучающих диодов.

Волноводные характеристики структур «GaN/InGaN-сапфир» исследовались с использованием призм связи из фосфида галлия или рутила для лазерного излучения с длинами волн  $\lambda = 632,8, 526,5, 532$  и  $1053$  нм. Возбуждение соответствующей волноводной моды в видимом диапазоне фиксировалось по максимуму интенсивности ее  $m$ -линии, выводимой из волновода выходной призмой связи. В экспериментах с одной из исследованных структур наблюдалось возбуждение девятнадцати ТЕ-мод на длине волны  $632,8$  нм, пятнадцати ТМ-мод на длине волны  $526,5$  нм и двадцати ТЕ-мод на длине волны  $532$  нм. Возбуждение волноводных мод излучением из ближнего ИК диапазона ( $\lambda = 1053$  нм) визуально фиксировалось по излучению второй гармоники, генерируемой в волноводе. На основе измеренных значений эффективных показателей преломления для данной структуры на длинах волн  $633$  и  $1053$  нм рассчитан профиль показателя преломления, с использованием ВКБ-метода, который аппроксимирован функцией  $n(z) = n_s + (\Delta n/2)[1 - \text{th}[(z-h)/d]]$ , где  $n_s$  – показатель преломления сапфировой подложки,  $\Delta n$  – разность между показателем преломления основного слоя структуры GaN/InGaN и  $n_s$ . Параметр  $d$  характеризует толщину переходного слоя между подложкой и основным слоем, и параметр  $h$  соответствует глубине локализации середины переходного слоя, отсчитываемой от границы с покровной средой. В исследованных структурах экспериментально наблюдалась несинхронная волноводная генерация большого количества ТМ-мод на второй гармонике за счет взаимодействия типа  $ee-e$  при накачке импульсным излучением с  $\lambda = 1053$  нм. Наибольшая интенсивность второй гармоники получена для накачки, возбуждаемой в виде волноводной моды ТМ<sub>4</sub>.

Коэффициенты пропускания структур в спектральном диапазоне  $360-1100$  нм и отражения для диапазона  $220-2700$  нм измерялись с помощью спектрофотометров СФ-56 и СФ-256 при нормальном падении зондирующего пучка.

Таким образом, показано, что планарные структуры «GaN/InGaN-сапфир» обладают хорошими волноводными свойствами и перспективны для реализации нелинейных преобразований лазерного излучения в широкой спектральной области.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки на 2015 год и НИР по проектной части госзадания № 3.878.2014/ИК.

## Изучение структуры и фазового состава синтезированных образцов фосфата лития-железа и титаната-лития материалов для литий-ионных аккумуляторов

М.Д. Шарков<sup>1</sup>, М.Е. Бойко<sup>1</sup>, А.В. Бобыль<sup>1</sup>, А.М. Бойко<sup>1</sup>, Е.М. Ершенко<sup>1</sup>,  
Я.В. Зубавичус<sup>2</sup>, С.Г. Конников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021,  
Политехническая, 26

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 123182, пл. Академика Курчатова, 1  
тел: (812) 292-7985, факс: (812) 297-1017, эл. почта: [mischar@mail.ioffe.ru](mailto:mischar@mail.ioffe.ru)

Фосфат лития-железа (трифилит)  $\text{LiFePO}_4$  и титанат лития  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  входят в число материалов, предназначенных для использования в литий-ионных аккумуляторах. От двух образцов  $\text{LiFePO}_4$  и одного образца  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ , синтезированных химическим методом, были получены данные рентгеновской дифрактометрии (РД) на установке Bruker D8-DISCOVER (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) при  $\text{Cu K}\alpha_1$ -излучении. Кроме того, от тех же образцов на источнике синхротронного излучения «Сибирь-2» (НИЦ КИ) были зарегистрированы спектры EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure = дальняя тонкая структура рентгеновского поглощения) на К-крае Fe для  $\text{LiFePO}_4$  и на К-крае Ti для  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ . Результаты EXAFS-измерений обработаны специальным методом, созданным авторами данной работы [1].

### Результаты

1. Данные РД для образцов трифилита позволили определить, что оба образца содержат преимущественно  $\text{LiFePO}_4$  и фосфат железа-III  $\text{FePO}_4$ , а также в одном из образцов присутствует материал со шпинельной решеткой (например, магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  или маггемит  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ).
2. Данные РД для образца титаната позволили определить, что образец состоит в основном из  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  и окисла  $\text{TiO}_2$  в модификации анатаза.
3. Результаты анализа К Fe EXAFS-спектров от образцов  $\text{LiFePO}_4$  показывают, что оба образца могут включать в себя порядка 5–10% объемной доли  $\text{FePO}_4$ , а в образце, содержащем шпинельную фазу, эта фаза, вероятно, представляет собой маггемит с объемной долей около 15%.
4. В соответствии с анализом К Ti EXAFS-спектров от образца  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  показано, что в этом образце объемная доля компоненты анатаза может составлять около 40%.

Авторы выражают благодарности д.ф.-м.н. Агафонову Д.В. (Санкт-Петербургский государственный технологический институт), к.ф.-м.н. Байдаковой М.В. и Яговкиной М.А. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) за плодотворное сотрудничество.

### Литература

- [1] М.Д. Шарков, К.Ю. Погребницкий, М.Е. Бойко, ЖТФ 81(9), 134 (2011).

## Лазеры дальнего ИК диапазона на основе узкозонных полупроводников и гетероструктур с квантовыми ямами

В.И. Гавриленко

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, ГСП-105

тел: (831) 417-9462, факс: (831) 417-9474, эл. почта: [gavr@ipmras.ru](mailto:gavr@ipmras.ru)

Основным материалом для создания длинноволновых лазеров являются полупроводники АЗВ5. Однако сильное решеточное поглощение делает диапазон длин волн 20-60 мкм практически недоступным для ККЛ на основе GaAs и InP [1]. В этом диапазоне могут работать инжекционные лазеры на основе PbSnTeSe, где частоты оптических фононов существенно ниже, а симметрия законов дисперсии электронов и дырок практически исключает оже-рекомбинацию; рекордная длина волны генерации составляет 46 мкм [2]. Такие лазеры могут быть использованы для целей спектроскопии (см., например, [3]), однако в длинноволновой области их мощность составляет менее 1 мВт. Известны попытки создания лазеров на основе квантовых ям (КЯ) II-го типа InAs/GaInAs/InAs, где удалось достичь длин волн 9.5 мкм при оптической [4] и 10,4 мкм при электрической накачке в межзонной каскадной структуре [5]. В качестве препятствий для продвижения в длинноволновую область отмечалось возрастающее поглощение на свободных носителях и слабое перекрытие волновых функций электронов и дырок в КЯ II-го типа.

В другой узкозонной полупроводниковой системе А2В6 на основе соединений HgCdTe, которая свободна от последнего недостатка, сообщалось о достижении лазерной генерации вплоть до длины волны 5.3 мкм [6,7]. В работе [7] в качестве основного препятствия продвижения в более длинные волны рассматривалась оже-рекомбинация, хотя и отмечалось, что она может быть подавлена в структурах с КЯ. В цикле работ нашей группы в ИФМ РАН, выполненных совместно с технологами из ИФП СО РАН, продемонстрирована эффективная фотолюминесценция из HgCdTe структур вплоть до длины волны 26 мкм и показано, что доминирующим механизмом рекомбинации при высоких уровнях оптического возбуждения, необходимых для создания инверсии населенностей, является излучательная рекомбинация [8]. В работе [9] было продемонстрировано, что при этих условиях времена жизни фотоносителей могут достигать 5 пс, что позволяет рассчитывать на лазерный эффект при умеренном уровне накачки. Были рассчитаны и выращены лазерные структуры с квантовыми ямами с диэлектрическим волноводом на различные длины волн и получено стимулированное излучение вплоть до рекордно большой длины волны 8.9 мкм. В докладе обсуждаются возможности продвижения в дальний ИК диапазон вплоть до 30-50 мкм.

### Литература

- [1] B.S.Williams. Nature Photonics **1**, 517 (2007).
- [2] Л.Н.Курбатов, А.Д.Бритов, С.М.Караваев и др. Письма ЖЭТФ **37**, 422 (1983)
- [3] К.В.Маремьянин, А.В. Иконников, А.В.Антонов и др. ФТП (2015, в печати).
- [4] A.P.Ongstad, R.Kaspi, G.C.Dente et al. Appl. Phys. Lett. **92**, 141106 (2008).
- [5] Z. Tian, L. Li, H. Ye et al. Electronics Lett. **48**, 113 (2012).
- [6] J.M.Arias, M.Zandian, R.Zucca, J.Singh. Semicond. Sci. Technol. **8**, S255 (2003)
- [7] J.Bleuse, J.Bonnet-Gamard, G.Mula et al. J. Cryst. Growth **197**, 529 (1999).
- [8] S.V.Morozov, V.V.Rumyantsev et al. Appl. Phys. Lett. **104**, 072102 (2014).
- [9] S.V.Morozov, V.V.Rumyantsev et al. Appl. Phys. Lett. **105**, 022102 (2014).

## Разработка неклассических излучателей на основе полупроводниковых квантовых точек

В. А. Гайслер<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090,  
пр. Академика Лаврентьева, 13

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 630073,  
пр. К. Маркса, 20

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090,  
ул. Пирогова, 2

тел: (383)330-69-45, факс: (383)330-69-45, эл. почта: [vahvah55@mail.ru](mailto:vahvah55@mail.ru)

Создание неклассических излучателей, таких как излучатели одиночных фотонов (ИОФ) и излучатели фотонных пар (ИФП), запутанных по поляризации, является одной из наиболее актуальных проблем оптики и квантовой электроники в целом, так же, как и твердотельной нанофотоники, в частности. Неклассические излучатели формируют световые потоки с субпуассоновской статистикой, и в идеальном случае Фоковские фотонные состояния, состояния со строго заданным числом частиц. Они могут быть реализованы только на основе одиночной изолированной квантовой системы – атома, молекулы, центра окраски, «искусственного» атома – полупроводниковой квантовой точки (КТ).

Для создания эффективных неклассических излучателей одновременно требуется: 1) локализовать квантовую систему; 2) эффективно накачать ее; 3) эффективно собрать излучение. Все три перечисленные выше проблемы принципиально разрешимы с использованием современных полупроводниковых технологий, позволяющих интегрировать одиночную КТ в полупроводниковый микрорезонатор. Неоспоримым достоинством полупроводниковых излучателей является возможность токовой накачки КТ, что позволяет разрабатывать полностью твердотельные излучатели в виде миниатюрных светоизлучающих диодов.

В докладе представлены результаты разработок излучателей с токовой накачкой одиночных InGaAs КТ, селективно позиционированных в пределах апертуры полупроводникового Брэгговского микрорезонатора. Апертура микрорезонатора образована AlGaAs кольцом, которое используется для селективного позиционирования КТ, а также обеспечивает высокий уровень токового и оптического ограничения. Микрорезонатор обеспечивает высокий уровень внешней квантовой эффективности до 88% при добротности  $\sim 10^4$ . В этом случае фактор Парселла достигает значение  $F_p = 12.5$ , что задает быстродействие излучателя на уровне 10 ГГц. Расходимость выходного излучения не превышает  $NA \leq 0.2$ , что задает высокую эффективность ввода излучения в стандартное оптоволокно.

На основе разработанной конструкции были изготовлены лабораторные образцы излучателей. При криогенных температурах в пределах резонансной полосы в спектрах электролюминесценции проявляются узкие пики, отвечающие рекомбинации экситонов и биэкситонов одиночной InGaAs КТ, что является экспериментальным подтверждением возможности создания неклассических излучателей на базе разработанной конструкции микрорезонатора.

# Инжекционные микродисковые лазеры с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs, работающие до 100°C

Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>, Ю.В. Кудашова<sup>1</sup>, Э.И. Моисеев<sup>1</sup>, А.Е. Жуков<sup>1,3</sup>,  
М.В. Максимов<sup>1,2,3</sup>, М.М. Кулагина<sup>2</sup>, С.И. Трошков<sup>2</sup>,  
Ю.М. Задиранов<sup>2</sup>, А.А. Липовский<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Академический университет, ул. Хлопина, 8/3, Санкт-Петербург, 194021, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021,  
Политехническая, 26

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого,  
Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

тел: (812) 4486995, эл. почта: [krij@mail.ioffe.ru](mailto:krij@mail.ioffe.ru)

Микродисковые (МД) лазеры перспективны для реализации систем оптической связи на плате [1]. С их помощью, например, можно реализовать латеральный вывод излучения в

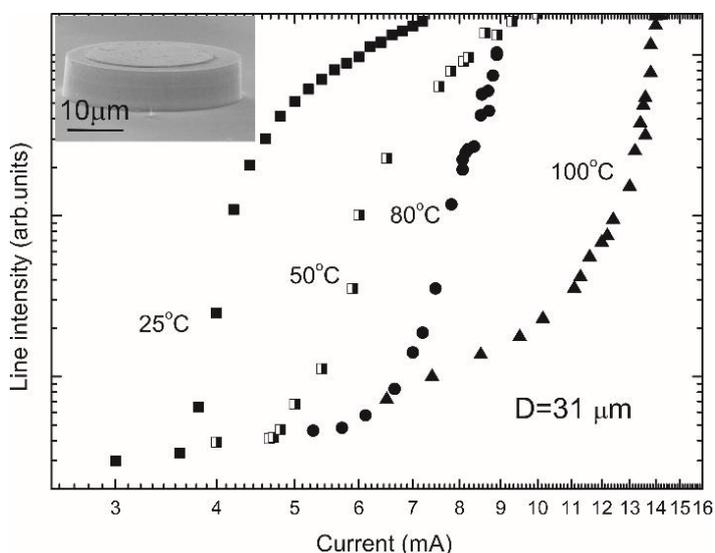


Рис. 1. Зависимость интенсивности резонансной линии от тока накачки.

оптически связанный магистральный волновод. Желательно, чтобы при малых размерах такие лазеры способны были работать в непрерывном режиме при высоких рабочих температурах. Однако, к настоящему времени наибольшая температура лазерной генерации составила 50°C, что было достигнуто в микролазерах диаметром 80 мкм с длиной волны излучения 1.23 мкм [2]. В настоящей работе нами исследованы инжекционные МД лазеры диаметром 15-31 мкм с активной областью на основе InAs/InGaAs квантовых точек. Продемонстрирована возможность достижения низкопороговой генерации на длине волны основного оптического перехода InAs/InGaAs квантовых точек вблизи 1.3 мкм, что явля-

ется наиболее длинноволновой генерацией в инжекционных МД на основе квантовых точек на подложках GaAs.

Пороговая плотность тока лазеров при комнатной температуре составила 600-900 А/см<sup>2</sup>. Наибольшая температура, при которой наблюдалась лазерная генерация, составила 100°C (рис.1), что является на сегодня наибольшей сообщенной рабочей температурой для микролазеров на основе КТ. Характеристическая температура, описывающая изменение порогового тока с увеличением температуры в диапазоне 20-80°C составила около 100К. Работа проведена при поддержке РФФИ (гранты 15-32-20238, 13-02-12032) и программы ОНИТ РАН.

## Литература

[1] K. J. Vahala, Nature 424, 839-846 (2003).

[2] M. Munsch, J. Claudon, N. S. Malik, K. Gilbert, P. Grosse, J.-M. Gerard, F. Albert, F. Langer, T. Schlereth, M. M. Pieczarka, S. Hofling, M. Kamp, A. Forchel, and S. Reitzenstein, Appl. Phys. Lett. 100, 031111 (2012).

## Высокоэффективный Si ИК светодиод со встроенными нанокристаллитами $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>, работающий при комнатной температуре

А. В. Шевлягин<sup>1</sup>, Н.Г. Галкин<sup>1</sup>, А. К. Гутаковский<sup>2</sup>, Т. С. Шамирзаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, 690041, Радио 5

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090,  
проспект Лаврентьева 1

тел: (423) 232-0682, факс: (423) 231-0452, эл. почта: [shevliagin@mail.ru](mailto:shevliagin@mail.ru)

В многочисленных работах, посвященных созданию кремниевых светоизлучателей, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн рассматриваются два основных пути повышения вероятности излучательной рекомбинации: (1) ослабление требований закона сохранения квази-импульса за счет нарушения трансляционной симметрии кристалла, например, посредством введения структурных дефектов; (2) внедрение в кремниевую матрицу включений, представляющих собой эффективный канал для прямых оптических переходов. В данной работе исследуются излучательная способность Si диодов, в область *p-n* перехода которых встроены нанокристаллиты (НК)  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>. Образцы получены в условиях

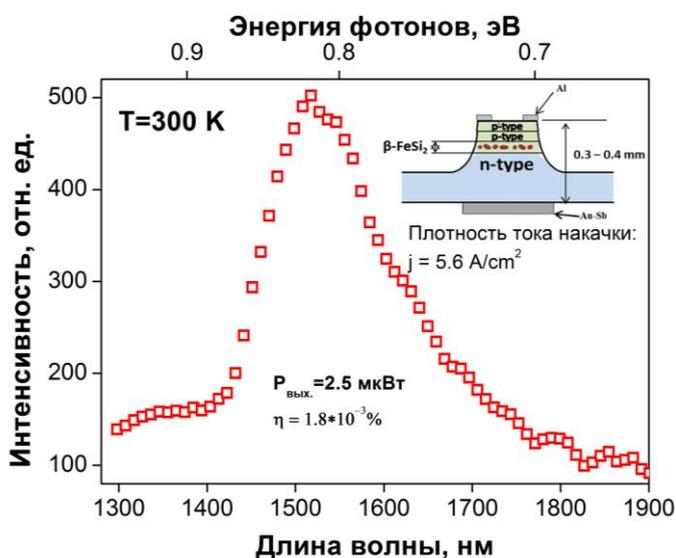


Рисунок 1 – Схематичное изображение светодиодной структуры и спектр электролюминесценции при комнатной температуре.

сверхвысокого вакуума на Si подложках чередованием твердофазной эпитаксии (формирование НК) и молекулярно-лучевой эпитаксии Si для получения многослойной структуры. Методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения установлено, что в результате формируются НК диаметром 2-4 нм, которые бездефектно встроены в Si матрицу, одноосно сжаты в направлении [010] или [001] и сопрягаются с решёткой Si следующим образом:  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> [010] или [001]//Si [111]. Диодные структуры, созданные на основе сформированных образцов демонстрируют интенсивную электролюминесценцию при комнатной температуре и относительно малом уровне инжекции в диапазоне длин волн 1400 – 1700 нм с выходной мощностью оптического излучения в 2-3 мкВт и внешним квантовым выходом до  $2 \times 10^{-3}$  % (Рис. 1). Нормированная на количество излучающего материала эффективность излучения в 8-10 раз превосходит аналогичный результат для плёночных гетероструктур Si/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>.

# Длинноволновая фотолюминесценция и стимулированное излучение в структурах на основе твердых растворов HgCdTe

С.В. Морозов<sup>1,2</sup>, В.В. Румянцев<sup>1</sup>, А.А. Дубинов<sup>1,2</sup>, В.Я. Алёшкин<sup>1,2</sup>, А.М. Кадыков<sup>1,2</sup>,  
М.А. Фадеев<sup>1,2</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>3</sup>, С.А. Дворецкий<sup>3</sup> и В.И. Гавриленко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИФМ РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия

<sup>2</sup>ННГУ им.Н.И.Лобачевского, просп. Гагарина, 23, Н.Новгород, 603950, Россия

<sup>3</sup>ИФП СО РАН, просп. ак.Лаврентьева, Новосибирск, 630090, Россия

тел: (831)417-94-62, факс: (831)414-94-64, эл. почта: [more@ipmras.ru](mailto:more@ipmras.ru)

Впервые получены спектры длинноволновой (до 26 мкм) межзонной фотолюминесценции (ФЛ) в узкозонных эпитаксиальных слоях  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  и исследована их зависимость от температуры [1]. Показано, что температурное гашение фотолюминесценции в гетероструктурах с квантовыми и потенциальными ямами на основе  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  выражено слабее по сравнению с объемными образцами [1, 2].

В эпитаксиальных слоях и гетероструктурах с квантовыми ямами на основе узкозонных твердых растворов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  исследования спектров фотолюминесценции при импульсном возбуждении показали, что время релаксации сигнала фотолюминесценции в структурах с квантовыми ямами увеличивается с ростом интенсивности накачки и достигает 5 мкс; сделана оценка необходимой мощности накачки для достижения инверсной населенности в подобных ямах. В структурах с квантовыми ямами обнаружена узкая линия, связываемая с излучением на переходах между состояниями континуума и уровнем глубокого центра, связанного с вакансиями катионов в барьерах [2].

В эпитаксиальном объемной пленке с  $x = 0.22$ , в которой согласно расчетам имеется волноводный слой для длин волн  $\sim 10$  мкм, было обнаружено обужение линии ФЛ на длине 8.6 мкм при увеличении мощности накачки, связанное с суперлюминесценцией из активного слоя структуры

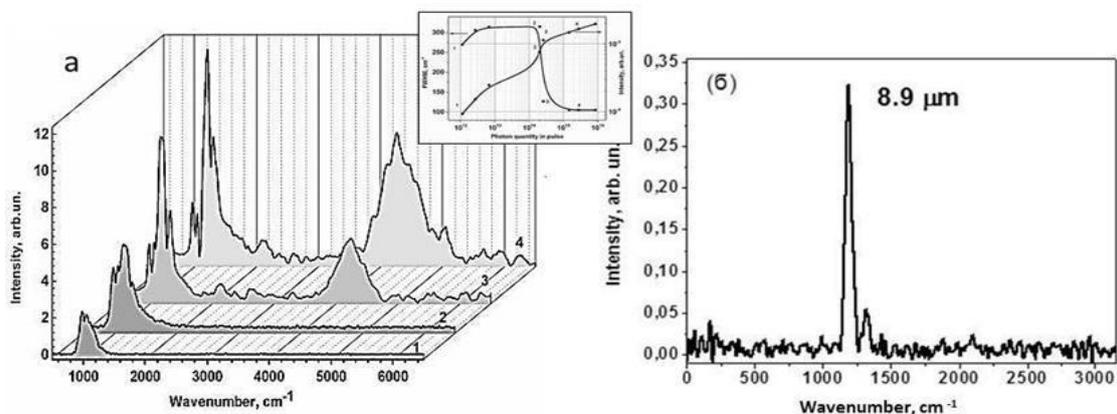


Рис. 1. (а) - Спектры ФЛ эпитаксиальной объемной пленки для различных мощностей накачки при  $T = 100$  К. (б) – Спектр стимулированного излучения лазерные структуры с квантовыми ямами.

(рис.1а). Подтверждением возникновения суперлюминесценции является нелинейная зависимость интенсивности линии от мощности накачки (см. вставку на рисунке 1а). Выращены лазерные структуры с квантовыми ямами с диэлектрическим волноводом, где получено стимулированное излучение вплоть до рекордной длины волны 8.9 мкм (рис. 1б). На основе структур с КЯ  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$  были выполнены расчеты дизайнов волноводных структур специальной конструкции для усиления длинноволнового излучения в диапазоне длин волн 10 – 30 мкм, которые демонстрируют хорошую локализацию ТЕ моды.

Таким образом, полученные в работе результаты свидетельствуют о потенциале гетероструктур на основе  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  для создания длинноволновых лазеров.

## Литература

- [1] S. V. Morozov et al. Applied Physics Letters 104 (7), 072102 (2014).
- [2] S. V. Morozov et al. Applied Physics Letters 105 (2), 022102 (2014).

## Изучение инъекции спин-поляризованных электронов в гетероструктуры $A^3B^5$ методом поляризованной катодолюминесценции

О.Е. Терещенко<sup>1,2</sup>, В.А. Голяшов<sup>1,2</sup>, И.Б. Чистохин<sup>1</sup>, Т.С. Шамирзаев<sup>1,2</sup>, А.С. Ярошевич<sup>1</sup>,  
А.А. Родионов<sup>1</sup>, И.А. Дербезов<sup>1</sup>, В.А. Гайслер<sup>1</sup>, А.К. Бакаров<sup>1,2</sup>, Д.В. Дмитриев<sup>1</sup>,  
А.И. Торопов<sup>1</sup>, И.И. Мараховка<sup>3</sup>, А.В. Коптилов<sup>3</sup>, Н.В. Кислых<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Лаврентьева, 13,  
Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2,  
Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup>ЗАО «ЭКРАН-ФЭП», ул. Зеленая горка, д.1, Новосибирск, 630060, Россия  
тел: (383)330-44-75, факс: (383)330-27-71, эл. почта: [teresh@isp.nsc.ru](mailto:teresh@isp.nsc.ru)

Изучение инъекции свободных низкоэнергетических спин-поляризованных электронов в полупроводники  $A^3B^5$  остается сложной технической задачей. Решение данной задачи может позволить создать спин-детектор свободных электронов с пространственным разрешением для использования в современных энергоанализаторах электронов, в частности, в методе фотоэмиссии с угловым разрешением. Предлагаемый в данной работе тип спин-детектора позволяет измерять три компоненты проекции спина. Наиболее простым решением видится изучение инъекции спин-поляризованных электронов в вакуумных фотодиодах, в которых источником спин-поляризованных электронов является GaAs с отрицательным электронным средством (ОЭС), а детектором - гетероструктура с квантовыми ямами.

Целью работы является изучение инъекции свободных спин-поляризованных электронов в гетероструктуры  $A^3B^5$  с квантовыми ямами AlGaAs/GaAs/AlGaAs и GaAs/InGaAs/GaAs методом поляризованной катодолюминесценции.

На рис.1 представлены спектры квантового выхода стандартного GaAs фотокатода и двух изучаемых структур с квантовыми ямами. Хорошо видна туннельная фотоэмиссия из квантовых ям (КЯ) GaAs и InGaAs, отмеченная стрелками, несмотря на наличие приповерхностного барьера GaAs/AlGaAs шириной более 20 нм. Для компоненты спина электронов нормальной к поверхности, степень поляризации катодолюминесценции в структуре с КЯ GaAs составила  $\sim 2\%$  при инъекции  $\sim 15\%$  спин-поляризованных электронов с энергией 0.5 эВ. Для компонент спина, лежащих в плоскости, измерена зависимость асимметрии интенсивности катодолюминесценции от энергии инжектируемых спин-поляризованных электронов. Для структур Pd/Fe/GaAs(001)/InGaAs величина асимметрии составила  $3 \cdot 10^{-3}$ . Измерено пространственное распределение поляризации в пучке электронов. В работе приводится оценка ожидаемой величины функции асимметрии, обсуждаются механизмы релаксации спина.

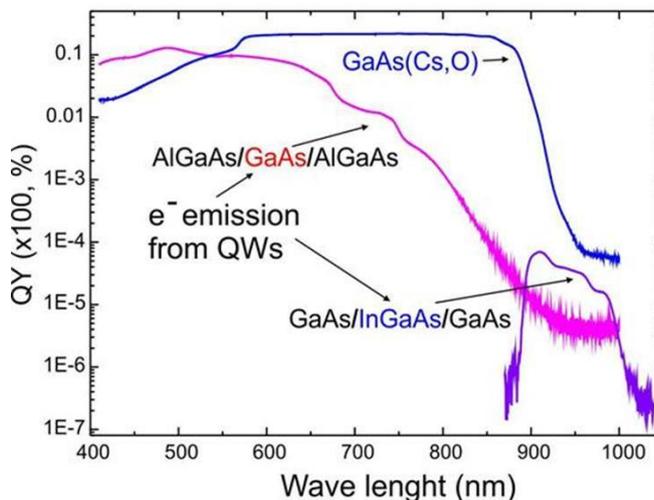


Рис. 1. Зависимость величины квантового выхода GaAs, AlGaAs/GaAs/AlGaAs и GaAs/InGaAs/GaAs фотокатодов от длины волны.

## Управление спектром излучения алмазов с NV центрами

Л. Н. Сафронов, В. А. Антонов, С. Н. Подлесный, **В. П. Попов**  
Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова, Новосибирск, 630090,  
пр. ак. Лаврентьева, 13  
тел: (383) 333-2537, факс: (383) 333-2771, эл. почта [popov@isp.nsc.ru](mailto:popov@isp.nsc.ru)

NV центр в алмазе является центром окраски и представляет собой комплекс, включающий в себя вакансию и примесный атом азота. Центр может находиться в различных зарядовых состояниях (0/-1) с уровнем перезарядки  $E_c - 2.58$  эВ.

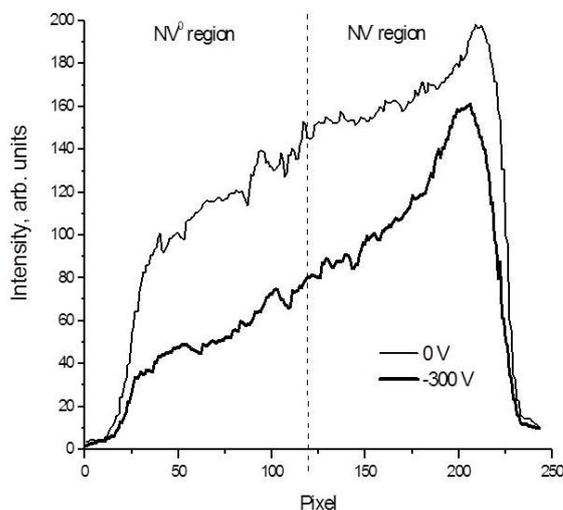
Спектры фотолюминесценции центра зависят от его зарядового состояния, и представляет собой так называемые оптические аналоги эффекта Мёссбауэра с бесфононными линиями вблизи 575 нм ( $NV^0$ ), либо 637 нм ( $NV^-$ ) и широкими фононными крыльями, прилегающими к ним в длинноволновой области спектра.

Размещая центры в области сильного электрического поля в специально созданных структурах (либо барьер Шоттки, либо p-n переход) удается управлять спектром излучения одиночного центра приложением электрического поля. При этом можно наблюдать два эффекта:

1. Изменение зарядового состояния центра (переход 0/-1 при пересечении уровня Ферми с уровнем перезарядки  $E_c - 2.8$  эВ) вызывает изменение спектра излучения за счет перестройки уровней самого NV центра.
2. Расщепление и сдвиг бесфононных линий за счет эффекта Штарка.

В представленной работе исследовалось влияние на спектр фотолюминесценции NV центров в монокристаллах искусственных алмазов синтезированных при высоких температурах и высоких давлениях. Использовались алмазы либо с высоким содержанием акцепторной примеси (бор), либо с высоким содержанием донорной примеси (азот). Центры окраски ( $NV^-$ ) формировались путем имплантации ионов азота и/или водорода для создания необходимой концентрации NV центров в тонких слоях алмаза при последующими термообработках.

Для возбуждения излучения люминесценции использовалось многомодовое оптоволокно с сердечником диаметром 40 мкм. Фокусировка лазерного излучения (532 нм) на образце контролировалась оптическим микроскопом со стократным увеличением. Величина напряжения прикладываемого к образцу с p-n переходом варьировалась от 0 до 300 В.  $NV^-$  центры рядом с n-электродом p-n перехода, находились сканированием лазерным излучением. Специально обработанный конец оптоволокна (pigtail) подводился к этой зоне и юстировался до получения максимального сигнала. Изменение интенсивности малиновой фотолюминесценции  $NV^-$  центров из-за увеличении концентрации  $NV^-$  центров в сильном поле ОПЗ обратно смещенного p-n перехода регистрировалось спектрометром. Полученные спектры позволили разрешить бесфононные линии NV центров и определить их смещение в сильном поле p-n перехода из-за эффекта Штарка.



## Экситон-плазмонное взаимодействие в системе с InAs/AlGaAs КТ и литографическими анизотропными наноантеннами

А.А. Лямкина<sup>1</sup>, С.П. Мощенко<sup>1</sup>, А.К. Бакаров<sup>1</sup>, А.И. Торопов<sup>1</sup>, К. Шрамль<sup>2</sup>,  
М. Канибер<sup>2</sup>, Д. Финли<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090,  
пр. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> Институт Вальтера Шоттки, Технический Университет Мюнхена,  
Гархинг, Германия, D-85748, Am Coulombwall 4

тел: (383)330-69-45, факс: (383)330-69-45, эл. почта: [lyamkina@isp.nsc.ru](mailto:lyamkina@isp.nsc.ru)

Металлические наноантенны многократно усиливают ближнее электрическое поле при возбуждении в них плазмонных мод [1]. Изучение взаимодействия с такой антенной с квантовыми точками (КТ) представляет большой интерес, так как оно может модифицировать кинетику и диаграмму направленности излучения. В данной работе методом микрофлуоресценции (микро-ФЛ) изучены оптические свойства гибридных структур с InAs/AlGaAs КТ, на поверхности которых были сформированы золотые наноантенны типа галстук-бабочка.

На Рис.1 представлены спектры расположенной рядом с антенной КТ, измеренные в ортогональных поляризациях относительно оси антенны. Максимальное значение сигнала микро-ФЛ отличается в 5 раз. На вставке приведены поляризационные зависимости инте-

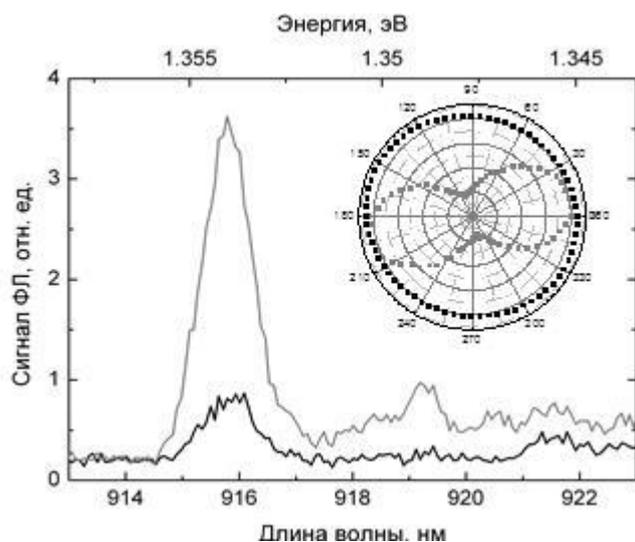


Рис.1 Спектры микро-ФЛ для КТ, расположенной рядом с наноантенной, измеренные в параллельной (серый) и перпендикулярной (чёрный) поляризациях относительно оси антенны. На вставке поляризационные зависимости для исследуемой КТ (серая) и контрольной КТ (чёрная)

грального сигнала ФЛ для исследованной КТ и контрольной КТ, расположенной вне массива наноантенн, при этом диаграмма направленности значительно изменилась и соответствует дипольной. Измерения кинетики микро-ФЛ показали уменьшение времени жизни экситонов в КТ, расположенных рядом с наноантеннами, в 3 раза по сравнению с контрольными. Таким образом, увеличение сигнала ФЛ, наличие сильной поляризационной зависимости и уменьшение времени жизни позволяют утверждать, что в гибридной структуре с КТ, расположенными близко к поверхности, присутствует сильное экситон-плазмонное взаимодействие между КТ и плазмонными наноантеннами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-02-00959). ААЛ выражает благодарность за предоставление финансовой поддержки в виде стипендии Президента РФ СП-805.2013.3 и стипендии Российского Квантового Центра.

### Литература

[1] K. Schraml, M. Spiegl, M. Kammerlocher, G. Bracher, J. Bartl, T. Campbell, J. Finley, M. Kaniber, Phys. Rev. B 90, 035435 (2014).

## Кристаллическое строение и энергетический спектр III-Sb/AlAs самоорганизованных квантовых точек

Д.С. Абрамкин<sup>1</sup>, К.М. Румынин<sup>1</sup>, А.К. Бакаров<sup>1</sup>, А.К. Гутаковский<sup>1</sup>,  
О.В. Кибис<sup>2</sup>, Т.С. Шамирзаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090,  
пр. ак. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup>НГТУ, Новосибирск, 630073, пр. Маркса, 20  
тел: (383) 330-69-45, эл. почта: demid@isp.nsc.ru

Квантовые точки (КТ) InSb, GaSb и AlSb, сформированные в матрице AlAs, в соответствии с расчётами [1] могут принадлежать новому классу полупроводниковых систем с энергетическим спектром первого рода и непрямой запрещённой зоной. Длительное время жизни экситона в таких КТ [2] делает их перспективными объектами для исследования динамики долгоживущих локализованных экситонов, в частности релаксации спина экситона в КТ. Работа посвящена исследованию кристаллического строения и энергетического спектра III-Sb/AlAs КТ, выращенных методом молекулярно лучевой эпитаксии. Для формирования КТ на поверхность AlAs (100) осаждался 1 монослой III-Sb. Затем КТ покрывались 50 нм слоем AlAs. Кристаллическое строение гетероструктур исследовано методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Несмотря на значительное рассогласование параметров решёток для материалов III-Sb/AlAs (7.7%÷12.6%) на ПЭМ изображениях гетероструктур с КТ отсутствуют дислокаций и муара. Это позволяет предполагать, что КТ псевдоморфно напряжены и сформированы из твердых растворов  $\text{III}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$ , рассогласование которых с AlAs по параметру решётки значительно ниже, чем для неперемешанных материалов. Энергетический спектр КТ изучался методом спектроскопии стационарной и время-разрешённой фотолюминесценции (ФЛ). В соответствии с [3], гетероструктурам второго рода присуще «синее» смещение полосы ФЛ, пропорциональное корню кубическому от плотности мощности возбуждения, поэтому для определения рода энергетического строения КТ анализировалась интенсивностная зависимость формы спектра ФЛ. Длительная (~100 мкс) кинетика затухания ФЛ КТ, говорит о разделении носителей заряда в пространстве квазиимпульсов. Экспериментальные исследования дополнены теоретическими расчётами энергетического спектра КТ, проведенными с учётом влияния перемешивания материалов и упругих деформаций на положение энергетических зон. Показано, что: (1) в зависимости от состава твёрдого раствора  $\text{III}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}/\text{AlAs}$  КТ могут иметь энергетическое строение, как первого, так и второго рода; (2) основное электронное состояние КТ первого рода лежит в непрямой  $X_{\text{XY}}$  долине зоны проводимости твёрдого раствора. Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 13-02-00073, 14-02-00033 и 14-02-31102), стипендиальной программы Президента РФ (№ СП-985.2013.5) и программы Министерства Образования и Науки РФ (№ 16.552.11.7091).

### Литература

- [1] Т. С. Шамирзаев, ФТП 45, 97 (2011).
- [2] T. S. Shamirzaev, J. Debus, *et. al.*, Phys. Rev. B 84, 155318 (2011).
- [3] N. N. Ledentsov, J. Bohrer, M. Beer, *et. al.*, Phys. Rev. B 52, 14058 (1995).

## Полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглощением для фемтосекундных лазеров ближнего инфракрасного диапазона

Г.М. Борисов<sup>1,2</sup>, В.Г. Гольдорт<sup>1</sup>, Д.В. Ледовских<sup>1</sup>, А. А. Ковалёв<sup>1</sup>, М.Н. Путятю<sup>1</sup>,  
В.В. Преображенский<sup>1</sup>, **Н.Н. Рубцова**<sup>1</sup>, Б. Р. Семягин<sup>1</sup>,

В.Е. Кисель<sup>3</sup>, А.С. Руденков<sup>3</sup>, Н.В. Кулешов<sup>3</sup>, А.А. Павлюк<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
просп. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2,  
Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup>НИИ оптических материалов и технологий БНТУ, Беларусь,  
проспект Независимости, 65, строение 17, 220103, Минск, Беларусь

<sup>4</sup>Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,  
просп. Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090, Россия

тел: (383)333-27-69, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [rubtsova@isp.nsc.ru](mailto:rubtsova@isp.nsc.ru)

Источники когерентного излучения в виде фемтосекундных импульсов находят применение в фундаментальных исследованиях различных сред, а также в прикладных исследованиях в биологии, медицине и других областях. Полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглощением на основе соединений  $A_3B_5$ , в принципе, способны обеспечивать устойчивый режим пассивной синхронизации мод фемтосекундных лазеров в области длин волн излучения 1-3 микрон.

К подобным оптическим элементам предъявляются высокие требования (высокий коэффициент отражения в спектральной области, перекрывающей область усиления данного лазера, быстродействие, необходимый уровень насыщаемых потерь, низкий уровень ненасыщаемых потерь), а сами зеркала работают в условиях острой фокусировки излучения на поверхность. Поэтому их конструирование, а также изготовление и тестирование представляют достаточно серьезную научно-техническую задачу.

В докладе сообщается о последних результатах по разработке полупроводниковых зеркал с насыщающимся поглощением для лазеров ближнего инфракрасного диапазона, о тестировании пробных образцов и собственно зеркал. В двух лазерах инфракрасного диапазона:  $Yb^{3+}:KY(WO_4)_2$  [1] и  $Yb^{3+}:KGd(WO_4)_2$  были получены устойчивые режимы синхронизации мод с короткими импульсами (114 и 162 фс, соответственно), с высокой средней мощностью (5 и 8,8 Вт), с энергией импульса 71 и 142 нДж, соответственно. Высокое оптическое качество полупроводниковых зеркал подтверждается также высокой эффективностью работы указанных лазеров (достигнута оптическая эффективность 33,3% и 37,5% соответственно).

Обсуждаются дальнейшие перспективы разработки полупроводниковых зеркал с насыщающимся поглощением.

### Литература

- [1] A.A. Kovalyov, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, N.N. Rubtsova, B.R. Semyagin, V.E. Kisel', A.S. Rudenkov, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk "Efficient high power femtosecond  $Yb^{3+}:KY(WO_4)_2$  laser", Laser Physics Letters, Vol. 12 (2015) 075801 (4pp).
- [2] V.E. Kisel', A.S. Rudenkov, A.A. Pavlyuk, A.A. Kovalyov, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, N.N. Rubtsova, B.R. Semyagin, and N.V. Kuleshov "High power efficient SESAM-mode-locked  $Yb:KGW$  bulk laser" Optics Letters, Vol. 40, No12, pp. 2707-2710, June 15 2015.

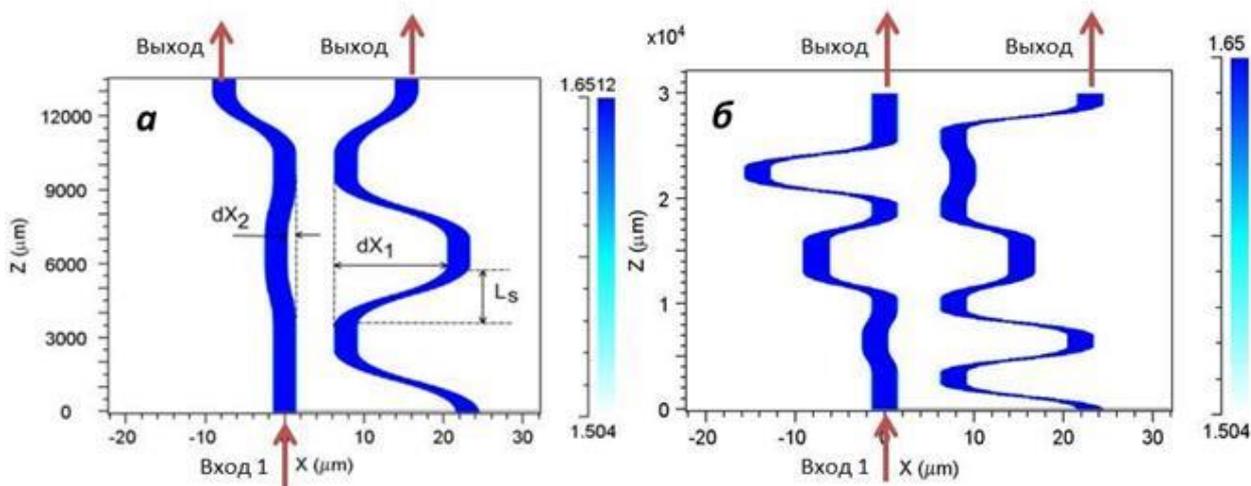
# Интерферометр Маха-Цендера, слабо чувствительный к технологическим ошибкам изготовления

А. В. Царев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090  
тел.: (383) 330-6578, факс: (383) 333-2771, эл. почта: tsarev@isp.nsc.ru

В данной работе предлагается и исследуется оригинальный вариант асимметричного интерферометра Маха-Цендера, используемого в качестве делителей мощности с низким влиянием на его характеристики технологических ошибок изготовления. Задержка по фазе у данного асимметричного интерферометра достигается за счет смещения позиции плеч интерферометра относительно их симметричного положения. Данный фазовый сдвиг монотонно зависит от структурных параметров интерферометра и достигает оптимальных значений



Геометрия интерферометра Маха – Цендера, слабо чувствительного к технологическим ошибкам. а) делитель пучка в виде асимметричного интерферометра Маха – Цендера; б) Составной трехсекционный интерферометр Маха – Цендера.

(около  $\pi/2$ ) для величин смещения порядка 7 мкм, что легко контролируется в ходе изготовления устройства методами оптической литографии. В ходе проведенного численного моделирования методом распространяющегося пучка (BPM) установлено, что при тех же требованиях к технической реализации, данная схема обладает в несколько раз большей устойчивостью (чем стандартный симметричный интерферометр) своих характеристик к ошибкам изготовления, а также значительно более расширенным диапазоном рабочих оптических длин волн. Предложенный делитель пучка и интерферометр Маха-Цендера со смещенным положением плеч могут найти применение в различных оптических элементах радиофотоники, оптической связи и при создании оптических сенсоров. Автор благодарит компанию Synopsys, Inc. за предоставление лицензионного программного обеспечения BeamProp and Full-Wave от Rsoft (<http://optics.synopsys.com/rsoft/index.html>) для компьютерного моделирования методами BPM и FDTD, соответственно.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-29-0812014.

## Оптические свойства кирально-модулированных фотонных структур

С.Г. Тиходеев

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия.  
тел: (499)503-81-02, эл. почта: [tikh@gpi.ru](mailto:tikh@gpi.ru)

Киральная микро- и наноструктуризация полупроводников позволяет создать искусственные киральные среды с оптической активностью (способностью вращать плоскость поляризации света и циркулярным дихроизмом), на много порядков превышающей оптическую активность естественных киральных материалов. Недавно было продемонстрировано, что включение слоя кирального фотонного кристалла в структуру с излучающими неполяризованными квантовыми точками (КТ) позволяет сделать их фотолюминесценцию циркулярно-поляризованной [1-3]. В докладе будет дан обзор исследований оптических свойств искусственных киральных сред, будут проанализированы физические принципы работы кирально-модулированных структур для создания компактных источников циркулярно-поляризованного света.

### *Литература*

- [1] K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Arakawa, and M. Kuwata-Gonokami, Phys. Rev. Lett. **106**, 057402 (2011).
- [2] A.A. Maksimov, I.I. Tartakovskii, E.V. Filatov, S.V. Lobanov, N.A. Gippius, S. G. Tikhodeev, C. Schneider, M. Kamp, S. Maier, S. Hofling, and V.D. Kulakovskii, Phys. Rev. B **89**, 045316 (2014).
- [3] S.V. Lobanov, T. Weiss, N.A. Gippius, S.G. Tikhodeev, V.D. Kulakovskii, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami, Optics Lett. **40**, 1528 (2015).

# Эффекты гигантского магнитосопротивления в гибридных структурах ферромагнетик/полупроводник, индуцированные оптическим излучением

Н.В. Волков<sup>1</sup>, А.С. Тарасов<sup>1</sup>, М.В. Рауцкий<sup>1</sup>, А.В. Лукьяненко<sup>1,2</sup>,  
С.Н. Варнаков<sup>1,2</sup>, С. Г. Овчинников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИФ СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок, 50

<sup>2</sup> СибГАУ, Красноярск, 660014, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31  
тел: (391) 243-2635, факс: (391) 243-8923, эл. почта: volk@iph.krasn.ru

Интерес к магниторезистивным (MR) эффектам в гибридных структурах обусловлен как фундаментальными проблемами, так и возможностью интегрировать функциональные свойства, определяемые MR эффектами, в электронные устройства. Мы показали, что созданные на основе гибридных структур типа *ферромагнитный металл/диэлектрик/полупроводник* устройства, могут проявлять необычные магнитотранспортные свойства. Для устройств, изготовленных на основе гибридных структур FM/SiO<sub>2</sub>/p(n)-Si (FM=Fe, FeNi, Mn, Fe<sub>3</sub>Si, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), обнаружены гигантские MR эффекты на постоянном и переменном токах [1-4]. Наблюдаемые эффекты связаны с поверхностными состояниями, локализованными вблизи SiO<sub>2</sub>/p(n)-Si границы и с процессами их перезарядки.

Гигантским оказался отклик транспортных свойств на действие магнитного поля для гибридных структур в неравновесных условиях, созданных оптическим излучением. MR эффект, индуцированный излучением диодного лазера, реализован в планарном устройстве, изготовленном из структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/p-Si. Проводимость устройства изменяется более чем в 500 раз при увеличении поля до 1 Т (величина MR превышала 10<sup>5</sup> %). Величиной и знаком эффекта можно в широких пределах управлять напряжением смещения и полярностью магнитного поля. Индуцируемый оптическим излучением MR эффект обусловлен двумя основными физическими механизмами. Один из них связан с поверхностными состояниями и с их участием в процессах захвата-эмиссии равновесных и неравновесных носителей заряда. Влияние магнитного поля сводится к изменению энергетической структуры поверхностных центров. Другой механизм влияния магнитного поля связан с силой Лоренца, которая отклоняя траектории фото-генерированных носителей заряда, изменяет скорость их рекомбинации и, тем самым, изменяет проводимость устройства. Особенности поведения MR эффекта определяются структурной асимметрией устройства, полярностью магнитного поля, знаком и величиной напряжения смещения.

Мы считаем, что гибридные структуры на основе Si могут рассматриваться как основа для формирования функциональных устройств, управляемых одновременно смещением, оптическим излучением, магнитным полем и совместимых при этом с КМОП технологией.

## Литература

- [1] N.V. Volkov, A.S. Tarasov et al., *J. Appl. Phys.* **109**, 123924 (2011).
- [2] N.V. Volkov, A.S. Tarasov et al., *J. Appl. Phys.* **112**, 123906 (2012).
- [3] N.V. Volkov, A.S. Tarasov et al., *J. Appl. Phys.* **114**, 093903 (2013).
- [4] N.V. Volkov, A.S. Tarasov et al., *Appl. Phys. Lett.* **104**, 222406 (2014).

# Комбинационное рассеяние света и инфракрасное поглощение полупроводниковыми нанокристаллами на плазмонных структурах

А.Г. Милёхин<sup>1,2</sup>, Л.Л. Свешникова<sup>1</sup>, Т.А. Дуда<sup>1</sup>, Е.Е. Родякина<sup>1,2</sup>,  
С.А. Кузнецов<sup>2</sup>, V.M. Dzhagan<sup>3</sup>, А.В. Латышев<sup>1,2</sup>, D.R.T. Zahn<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова,  
Новосибирск, 630090, пр.-кт Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> Новосибирский Государственный университет,  
Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

<sup>3</sup> Semiconductor Physics, Technische Universität Chemnitz, D-09107, Chemnitz  
тел: (383) 316-6054, факс: (383) 333-2771, эл. почта: [milekhin@isp.nsc.ru](mailto:milekhin@isp.nsc.ru)

В работе обсуждаются результаты исследования явления гигантского комбинационного рассеяния света (ГКРС) и усиления инфракрасного (ИК) поглощения оптическими фонами нанокристаллов (НК) CdSe на плазмонных подложках.

Монослойные и субмонослойные покрытия коллоидных НК CdSe были сформированы с помощью технологии Ленгмюра-Блоджетт на массивах нанокластеров Au (Рис.1а), димеров и наноантенн (Рис.1б), а также на одиночных димерах, изготовленных с помощью нанолитографии. Энергия локализованного поверхностного плазмона в таких металлических структурах находится в интервале от видимого до ИК спектрального диапазона. Контроль структурных параметров наноструктур осуществлялся сканирующей электронной микроскопией (СЭМ). В спектрах ГКРС нанокристаллов CdSe наблюдается значительное усиление интенсивности фонных мод и их обертонов (Рис.1а), что позволило исследовать детали фонного спектра полупроводниковых НК. Обсуждается зависимость коэффициента усиления сигнала ГКРС (до величины  $2 \times 10^3$ ) от длины волны возбуждения и от размеров нанокристаллов, имеющая резонансный характер.

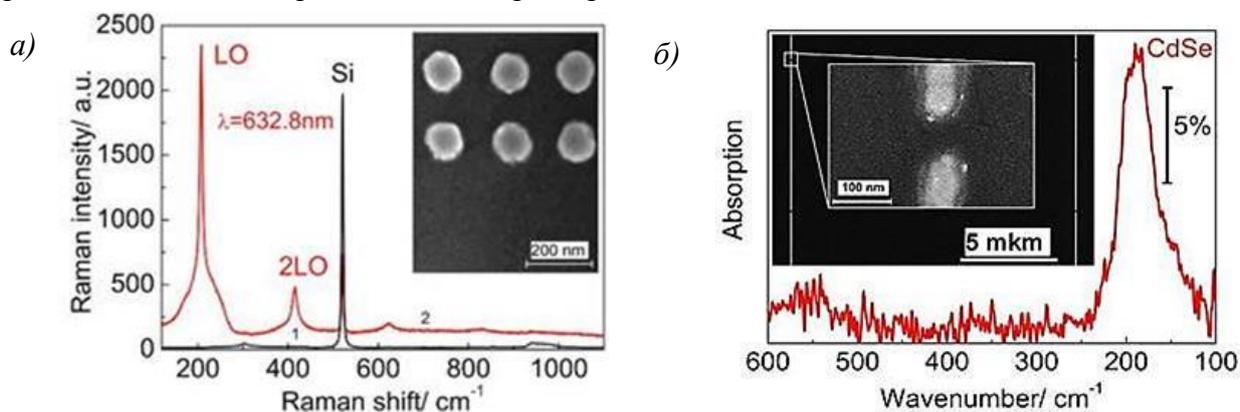


Рис 1. а)- Спектры КРС НК CdSe на Si (кривая 1) и на массиве нанокластеров Au (кривая 2). б)- Спектр ИК поглощения монослоя НК CdSe на массиве наноантенн. СЭМ изображения фрагментов структур показаны на вкладках (зазор между антеннами показан с большим увеличением).

Сообщается об изучении анизотропии ГКРС НК CdSe на массивах димеров нанокластеров и на одиночных димерах в зависимости от их размеров. Сделан вывод о наблюдении сигнала ГКРС от одиночных НК CdSe различного размера.

Обсуждаются результаты исследования эффекта усиления ИК поглощения оптическими фонами НК CdSe на массивах наноантенн, обусловленного сильной локализацией электромагнитного поля вблизи торцов наноантенн, в зависимости от их структурных параметров и от пространственной плотности НК.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-12-01037).

## Эмиссия горячих и термализованных фотоэлектронов из $p$ -GaAs(Cs,O) с положительным и отрицательным средством

А.Г. Журавлев<sup>1,2</sup>, А.С. Романов<sup>1,2</sup>, В.Л. Альперович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
пр. ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

тел: (383)330-98-74, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [alper@isp.nsc.ru](mailto:alper@isp.nsc.ru)

Спектральный порог и величина тока фотоэмиссии из кристалла в вакуум определяются, как правило, поверхностным потенциальным барьером, который необходимо преодолеть «горячим» фотовозбужденным электронам. Практически важным исключением являются полупроводниковые  $p$ -GaAs(Cs,O) фотоэмиттеры с отрицательным эффективным электронным средством (ОЭС), в которых благодаря цезий-кислородному активирующему покрытию уровень вакуума оказывается ниже дна зоны проводимости в объеме кристалла, поэтому спектральный порог фотоэмиссии соответствует ширине запрещенной зоны  $\epsilon_g$ , а величина тока определяется диффузией термализованных фотоэлектронов и вероятностью их выхода в вакуум. Несмотря на широкое использование ОЭС-фотокатодов, задачи выяснения физических механизмов и повышения квантового выхода эмиссии электронов по-прежнему актуальны. В работах [1,2] наблюдались нетривиальные особенности эволюции электронного средства и вероятностей выхода горячих и термализованных электронов при нанесении цезия на As-обогащенную и Ga-обогащенную поверхности GaAs(001), когда средство остаётся положительным, и в спектрах квантового выхода фотоэмиссии доминирует вклад горячих фотоэлектронов. Задача данной работы состоит в определении соотношения вкладов горячих и термализованных электронов при переходе от положительного электронного средства (ПЭС) к отрицательному при совместной адсорбции Cs и O<sub>2</sub> на поверхности GaAs(001). Эта задача решалась методом спектроскопии квантового выхода фотоэмиссии, адаптированным для исследования систем с параметрами, меняющимися во времени [1]. При положительном средстве в спектрах квантового выхода фотоэмиссии наблюдается два спектральных порога: высокоэнергетический порог, зависящий от величины средства и соответствующий эмиссии горячих электронов, и порог на ширине запрещенной зоны GaAs, соответствующий "термостимулированной фотоэмиссии" электронов, рожденных светом ниже уровня вакуума и термализованных вверх по энергии благодаря поглощению фононов. В области ОЭС имеется только один порог на  $\epsilon_g$ , однако в спектре также удается выделить вклад горячих электронов. В области ПЭС наблюдается максимум вероятности выхода как функции Cs покрытия, а также гистерезис зависимости вероятности выхода от величины средства. При переходе от ПЭС к ОЭС отношение вклада термализованных к вкладу горячих электронов резко возрастает. Полученные данные обсуждаются в рамках известных механизмов эмиссии, с учетом возможного рассеяния импульса и энергии электронов на границе полупроводник-слой (Cs,O)-вакуум.

### Литература

- [1] А.Г. Журавлев и др., Письма в ЖЭТФ **98**, 513 (2013).
- [2] A.G. Zhuravlev et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 251602 (2014).

## Определение подвижности неосновных электронов в $p\text{-Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.78}\text{Te}$ при температуре жидкого азота

А.В. Трифанов<sup>1</sup>, Д.Ю. Протасов<sup>2</sup>, В.Я. Костюченко<sup>3</sup>, С.А. Дворецкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
г. Новосибирск, 630108, ул. Плеханова, 10

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. Академика А.В. Ржанова СО РАН,  
г. Новосибирск, 630090, пр-т Академика Лаврентьева, 13

<sup>3</sup> Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, 630073, пр-т Карла Маркса, 20  
эл. почта: *trifanov.alexh@mail.ru*

Наиболее распространенными методами определения концентрации и подвижности основных носителей заряда в полупроводниках являются измерения напряжения Холла и магнитосопротивления [1]. Для полупроводниковых материалов, которые используются в фотоприемниках, необходимо знать подвижность неосновных носителей заряда. Обычно для этого используются методы, основанные на методе спектра подвижности. Однако, метод спектра подвижности чувствителен к шумовой составляющей измеренных сигналов [2]. В  $\text{CdHgTe}$   $p$ -типа с  $x \sim 0.2$  при использовании интерполяции для обработки данных, определить подвижность и концентрацию неосновных электронов этими методами не удаётся [3].

В работе показано, что использование цифрового фильтра нижних частот при автоматизированных измерениях позволяет подавить шумовую компоненту в экспериментальных данных. Эксперименты проводились на образцах  $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.78}\text{Te}$   $p$ -типа, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Анализируется влияние случайного шума и шума квантования, появляющегося при оцифровке измеряемого сигнала с помощью аналогово-цифрового преобразователя. Использование цифрового фильтра позволяет снизить погрешность определения методом спектра подвижности в сочетании с многозонной подгонкой концентрации и подвижности основных носителей заряда (легких и тяжелых дырок). В большинстве случаев удается определить параметры неосновных электронов, с погрешностью 40%. При тщательной настройке параметров фильтра индивидуально для каждого образца возможно снижение погрешности для электронов до 30%.

### Литература

- [1] Кучис Е.В. *Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования*. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
- [2] Трифанов А.В. *Уменьшение погрешности определения параметров носителей заряда цифровой фильтрацией* / А.В. Трифанов, В.Я. Костюченко, Д.Ю. Протасов // X Международные научный конгресс и выставка Интер Экспо Гео-сибирь-2014. Материалы Международной конференции «СибОптика – 2014» Т2: Приборные и метрологические аспекты измерительной техники, 2014., С. 94-97.
- [3] V. S. N. Murthy *Multicarrier conduction and Boltzmann transport analysis of heavy hole mobility in HgCdTe near room temperature* / V. S. N. Murthy // *Journal of applied physics* Vol. 106, 2009. – P. 113708-1 - 113708-6.

## Формирование и оптические свойства многослойных наноструктур Si/SiO<sub>2</sub>

А.А. Гисматулин<sup>1</sup>, В.А. Володин<sup>1,2</sup>, Г.Н. Камаев<sup>1</sup>, С.Г. Черкова<sup>1</sup>, А.Г. Черков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2  
тел: (383)330-52-57, факс: (383)330-52-57, эл. почта: [aagismatulin@isp.nsc.ru](mailto:aagismatulin@isp.nsc.ru)

В данной работе структуры, состоящие из чередующихся слоев  $\alpha$ -Si:H и SiO<sub>2</sub>, были изготовлены путем осаждения пленок  $\alpha$ -Si:H толщиной 8÷12 нм с последующим их прокислением в плазме чистого кислорода на определенную глубину на установке плазмохимического осаждения с широкоапертурным источником и индуктивным возбуждением на подложках кремния n-типа с разным уровнем легирования [1]. Всего было проведено до шести циклов осаждения/окисления. Дополнительно структуры отжигались до температур 1100 °С в атмосфере азота. Свойства полученных структур анализировались с помощью спектральной эллипсометрии (*in situ*), из данных спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), фотолюминесценции (ФЛ) и фотопроводимости (в спектральном диапазоне 250÷1200нм).

Положение пика КРС в спектральных областях 150 и 470-480 см<sup>-1</sup> в исходных структурах соответствует аморфной фазе кремния. После высокотемпературного отжига наблюдается пик при ~518 см<sup>-1</sup>, свидетельствующий о формировании кристаллических нанокластеров (это подтверждается также наблюдениями с помощью высокоразрешающей электронной микроскопии). Наличие низкоэнергетического крыла в спектре КРС после отжига, возможно, свидетельствует о неполной кристаллизации кремния, о наличии очень тонкого аморфного переходного слоя на гетерогранице Si/SiO<sub>2</sub>.

Положение пиков ФЛ для исходной многослойной структуры  $\alpha$ -Si/SiO<sub>2</sub> качественно согласуется с расчетными данными работы [2], в которой наблюдалось влияние квантово-размерного эффекта на оптические свойства двумерных слоев аморфного гидрогенизированного кремния с толщинами порядка нескольких нанометров. Высокотемпературный отжиг приводит к сдвигу положения пика ФЛ в коротковолновую область спектра. В спектрах фотолюминесценции (ФЛ) появляется и растет полоса с максимумом в районе ~500 нм, характерная для нанокластеров Si в окисле.

В спектрах фотопроводимости проявляется два слабо выраженных пика (дуплет) в области длин волн 750 и 550 нм. Увеличение числа слоёв приводит к увеличению сигнала, который нелинейно зависит от приложенного напряжения и сдвигается в коротковолновую область спектра.

### Литература

- [1] Г.Н. Камаев, А.А. Гисматулин, М.Д. Ефремов, А.Х. Антоненко, С.А. Аржанникова, В.А. Володин, Д.В. Марин. Вестник НГУ. Серия: Физика, **6** 107 (2011).  
[2] Allan G., Delerue C., Lannoo M. *Appl. Phys. Lett.* **71** 1189 (1997).

## Проблемы создания высокоэффективных солнечных преобразователей для космических аппаратов

О.П. Пчеляков, В.В. Преображенский, М.А. Путято, А.С. Дерябин, Л.В. Соколов,  
**А.И. Никифоров**, А.К. Гутаковский, Е.М. Труханов, Н.А. Паханов, А.П. Василенко,  
И.Д. Лошкарёв, Д.И. Феклин, В.М. Владимиров\*, А.С. Паршин\*\*

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск Россия,

\* НПФ «Электрон»,

\*\*СибГАУ, Красноярск.

Тел: (383) 330-7745, факс: (333) 333-2322

Современные высокоэффективные солнечные элементы (СЭ) представляют собой сложные многослойные гетеросистемы с КПД до 46% при концентрации солнечного излучения в несколько сотен солнц. Они состоят из трех основных p-n переходов, выполненных из Ge, InGaAs, InGaP соединенных последовательно туннельными диодами. Всё большее применение в этом процессе находят нанотехнологии [1,2]. Мировой рекорд по эффективности солнечных батарей при использовании молекулярной эпитаксии достигнут находящейся в «Кремниевой долине» фирмой Solar Junction [3]. В ИФП СО РАН ведутся работы по созданию высокопроизводительной аппаратуры для сверхвысоковакуумной технологии молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур солнечных элементов [4].

Результаты наших исследований показали, что методом молекулярно-лучевой эпитаксии можно выращивать плёнки GaAs на подложках Si с плотностью прорастающих дислокаций менее  $10^6$  см<sup>-2</sup>, что соответствует лучшим мировым достижениям. Проведено сравнение характеристик GaAs солнечных элементов, сформированных на подложках GaAs и Si. Намечены пути оптимизации технологии для дальнейшего улучшения свойств структур GaAs/Si. Обобщая вышеуказанное можно сделать вывод, что достигнутый к настоящему моменту уровень технологии позволяет получать эффективность  $E_{eff}$  отдельного GaAs каскада на неактивной кремниевой подложке (с учетом устранения потерь на отражение  $R=30-35\%$ ) на уровне 18.5%. Полученные экспериментальные данные позволили провести оценку характеристик двухкаскадного гибридного солнечного элемента GaAs/Si с зазором, заполненным кремнийорганическим компаундом с показателем преломления 1,5. Оценка проводилась в предположении, что GaAs модуль имеет просветляющее покрытие. Вклад кремниевого каскада в этом случае составляет 1,94%. При трехконтактной схеме подключения гибридного СЭ изготовленного в ИФП СО РАН КПД составляет 27% без концентрации света и в соответствие с данными, полученными в лаборатории В.М.Андреева, более 34% при концентрации 200 солнц.

### Литература

- [1]. Андреев В.М. Концентраторная солнечная фотоэнергетика, Альтернативная энергетика и экология, т.5-6 стр. 40-44 (2012)
- [2]. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики, ФТП, т.38, 8 страницы: 937-948 (2004)
- [3]. Bill Scanlon, NREL Award-Winning PV Cell Pushes Efficiency Higher Jan 02, 2013 <<http://www.dailyenergyreport.com/award-winning-pv-cell-technology-pushes-efficiency-higher/>>
- [4]. <http://lib.isp.nsc.ru/16/>

## Новый подход к формированию солнечных батарей на основе аморфного гидрогенизированного кремния и полупроводниковых силицидов

Н.Г. Галкин<sup>1</sup>, К.Н. Галкин<sup>1</sup>, **И.М. Чернев**<sup>1</sup>, А.В. Шевлягин<sup>1</sup>, Radek Fajgar<sup>2</sup>,  
The Ha Stuchlikova<sup>3</sup>, Jiri Stuchlik<sup>3</sup>, Zdenek Remes<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,  
Владивосток, 690041, Радио, 5, Россия

<sup>2</sup> Institute of Chemical Process Fundamentals of the ASCR, v. v. i., Rozvojová 135,  
165 02 Praha 6, Czech Republic

<sup>3</sup> Institute of Physics of the ASCR, v. v. i., Cukrovarnická 10/112, 162 00 Praha 6, Czech Republic

<sup>4</sup> Czech Technical University in Prague, Faculty of Biomedical Engineering,  
Sitna 3105, 27201 Kladno, Czech Republic

тел: (423) 231-0439, факс: (423) 231-0452, эл. почта: igor\_chernev7@mail.ru

Хорошо известно, что солнечные элементы на основе аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H), имеют низкий коэффициент поглощения в диапазоне энергий фотонов 1.1-2.0 эВ по сравнению с солнечными элементами на основе монокристаллического кремния. Внедрение нанокристаллитов (НК) Mg<sub>2</sub>Si (в качестве узкозонного полупроводника с шириной запрещенной зоны 0.77 эВ [1]) в a-Si:H привело к увеличению коэффициента поглощения (до 10<sup>4</sup> - 10<sup>6</sup> см<sup>-1</sup>) в диапазоне энергии фотонов 0.6-2.0 эВ [2].

Для всех выращенных p-i-n диодов с внедренными НК Mg<sub>2</sub>Si и Ca<sub>2</sub>Si фотолюминесценции (ФЛ) при комнатной температуре не наблюдалось, но сигнал электролюминесценции (ЭЛ) наблюдался от них при комнатной температуре в ближней инфракрасной области спектра. Максимальная ширина сигнала ЭЛ от 1.2 до 2.0 эВ наблюдается для диодов № 50-3 и № 50-4. Излучающие переходы в диодах были определены в НК Ca<sub>2</sub>Si и Mg<sub>2</sub>Si при 1,2 - 1,3 эВ. Переходы при этих энергиях имеют большую силу осциллятора. Это коррелирует с сильным поглощением в выращенных структурах с НК Ca<sub>2</sub>Si (Mg<sub>2</sub>Si) 1.2-1.3 эВ. Поскольку ФЛ от этих структур не наблюдалось при комнатной температуре, то основной причиной этого, в выращенных структурах, является безызлучательная рекомбинация. Таким образом в p-i-n-диодах ЭЛ наблюдается за счет формирования лавины при больших прямых смещениях (2.5-3.5 В) и излучающих рекомбинации на НК Ca<sub>2</sub>Si и Mg<sub>2</sub>Si, встроенных в матрицу a-Si:H.

Данная работа поддержана грантом РФФИ №13-02-00046\_a, грантом Президента РФ №МК-5470.2015.8, грантом фонда Чешских наук №GA1-05053S.

### Литература

[1] R.G. Morris, R.D. Redin, G.C. Dalielson, Phys. Rev. B **109**, 1909 (1958).

[2] N.G. Galkin, K.N. Galkin, I.M. Chernev, R. Fajgar, T.H. Stuchlikova, Z. Remes, J. Stuchlik, Physica Status Solidi C **10**, 1712 (2013).

# Фотодиоды на основе ДГС InAs/InAsSb<sub>0.1</sub>/InAsSbP ( $\lambda_{0.1}=5.2$ мкм), работающие в температурном диапазоне 50-300 К

П.Н. Брунков<sup>1,2</sup>, Н.Д. Ильинская<sup>1</sup>, С.А. Карандашев<sup>1</sup>, Н.Г. Карпухина<sup>3</sup>, А.А. Лавров<sup>1</sup>,  
**Б.А. Матвеев<sup>1</sup>**, М.А. Ременный<sup>1</sup>, Н.М. Стусь<sup>1</sup>, А.А. Усикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им.А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, СПб, 194021, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО), 197101, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ООО «ИоффелеД», Политехническая ул., 26, СПб, 194021, Россия

тел: (812) 292-79-55, факс: (812) 292-79-55, эл. почта: [bmat@iropt3.ioffe.ru](mailto:bmat@iropt3.ioffe.ru)

Фотометрия и пирометрия в среднем ИК диапазоне электромагнитного спектра (3-5 мкм) занимают лидирующее место по росту областей применения, благодаря постоянному совершенствованию как средств обработки сигнала, так и самих конструкций фотодиодов (ФД) [1]. Для важной с практической точки зрения длины волны 4.7 мкм ( $\lambda_{0.1}=5.2$  мкм) в искривленных градиентных структурах ( $R < 10$  см) нами ранее была получена квантовая эффективность 60% ( $S_{4.7 \text{ мкм}}=2.65$  А/Вт) в ФД на основе InAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub> [2]. В течение многих лет разными исследовательскими группами предпринимались неоднократные попытки приблизить параметры ФД на основе сложных гетероструктур, включая структуры второго типа к указанным характеристикам, однако все они оказались неудачными.

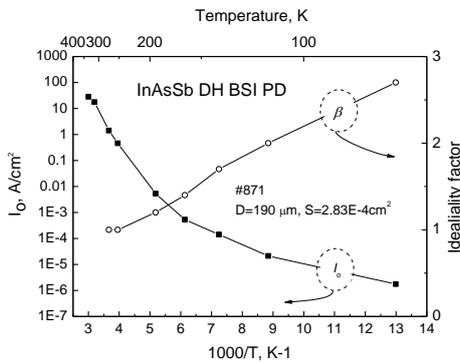


Рис.1 Зависимость  $I_0$  и  $\beta$  от температуры.

Кроме того, из-за большой кривизны описанных в [2] структур было невозможно использовать их для получения матричных фотоприемников большого формата. Создание же «плоских» неизопериодных эпитаксиальных структур на основе InAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub> ( $R > 50$  см) имеет очевидным следствием формирование большого числа дислокаций несоответствия и наклонных дислокаций в активной области прибора, могущих существенно повлиять на величину темновых токов. Детальных исследований, включая изучение возможного влияния дислокаций в таких «плоских» структурах на фотоэлектрические свойства в широком температурном диапазоне, не проводилось.

В работе мы представляем результаты и анализ исследований ФД, чувствительных в области длин волн 4.7 мкм, содержащих «плоскую» подложку  $n^+$ -InAs ( $n^+ \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $R > 50$  см), специально нелегированный активный слой  $n$ -InAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub> толщиной 8-16 мкм и широкозонный слой твердого раствора  $p$ -InAsSbP<sub>0.08</sub> (Zn) толщиной 2-3 мкм, в диапазоне температур от 50 до 300 К.

## Литература

- [1] G. Yu. Sotnikova et al, Proc. of SPIE Vol. 8073, 80731A (2011).
- [2] М. П. Михайлова и др., ПЖТФ, т. 22, в. 16, стр. 63-66 (1996).

## Разработка электролюминесцентных излучателей оптического диапазона на базе полупроводниковых нанокompозитов ZnS:Cu@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

А.Н. Бельтюков<sup>1</sup>, Р.Г. Валеев<sup>1</sup>, А.И. Чукавин<sup>1</sup>, Д.И. Петухов<sup>2</sup>, В.М. Ветошкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт УрО РАН, 426000, г. Ижевск, ул. Кирова 132

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. В.М. Ломоносова,  
Москва, 119991, Ленинские горы, д. 1

тел: 8(963)541-10-07, факс: 8(3412) 72-25-29, эл. почта: beltukov.a.n@gmail.com

К настоящему моменту электролюминофоры на основе соединений А2В6 достаточно хорошо изучены и широко применяются для создания светоизлучающих панелей, устройств символического отображения информации, в том числе матричных дисплеев [1]. Переход от порошкообразных к тонкопленочным люминофорам позволил значительно повысить яркость и долговечность электролюминесцентных приборов (ЭЛП) [2]. Дальнейшее улучшение характеристик ЭЛП видится в переходе к наноструктурному состоянию. Образование поверхностных центров свечения, число которых может быть существенно больше объемных центров, в частицах нанометрового размера приводит к повышению яркости свечения [3]. Кроме того, изменение морфологии приводит к сдвигам полосы излучения [4].

В настоящей работе в качестве рабочего слоя электролюминесцентного излучателя предлагается использовать нанокompозитную систему ZnS:Cu@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, представляющую собой нановключения сульфида цинка в матрице анодного оксида алюминия. Анодный оксид алюминия обладает уникальной пористой структурой. При вакуумном термическом осаждении ZnS в каналах пор происходит формирование наноструктур, морфология которых в основном определяется параметрами пористой структуры матрицы. Аттестация полученных образцов проводилась методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, рентгеновской дифракции. Проводится анализ спектров электролюминесценции.

Работы выполнялись при финансовой поддержке РФФИ (грант №15-19-10002).

### Литература

- [1] А. Абилих, К. Харконен, А. Паккала, Д. Смид (перевод В. Жданкин) Прозрачные электролюминесцентные дисплеи // Современная электроника, №4, 2008
- [2] Электролюминесцентные источники света / И.К. Верещагин, Б.А. Ковалев, Л.А. Косяченко, С.М. Кокин: Под ред. И.К. Верещагина. – М.: Энергоатомиздат, 1990
- [3] В. Г. Корсаков, М. М. Сычев, В. В. Бахметьев Синтез и свойства нанодисперсных полупроводников А2В6 и нанолуминофоров. Обзор // Конденсированные среды и межфазные границы, Том 14, №1, 2012
- [4] X.S. Fang et al. / Progress in Materials Science 56 (2011) 175–287

## Температурные зависимости адмиттанса InAs-МОП структур со сверхтонким окислом

А.П. Ковчавцев<sup>1</sup>, В.Г. Кеслер<sup>1</sup>, А.А. Гузев<sup>1</sup>, А.Е. Настовьяк<sup>1</sup>,  
А.В. Царенко<sup>1</sup>, З.В. Панова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИФП СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
тел: (383)330-52-56, факс: (383) 330-52-56, эл. почта: [kap@isp.nsc.ru](mailto:kap@isp.nsc.ru)

Пассивация поверхности полупроводника является важным технологическим процессом при создании приборных структур. Качество поверхности оценивалось из измерений C-V и G-V характеристик. Пассивация поверхности n-InAs ( $N_d \sim 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) проводилась собственным окислом толщиной  $\sim 3 \text{ нм}$ , который получен окислением образцов в удаленной кислородной плазме тлеющего разряда. После окисления на поверхности окисной пленки вакуумным испарением Au с использованием маски формировался металлический затвор.

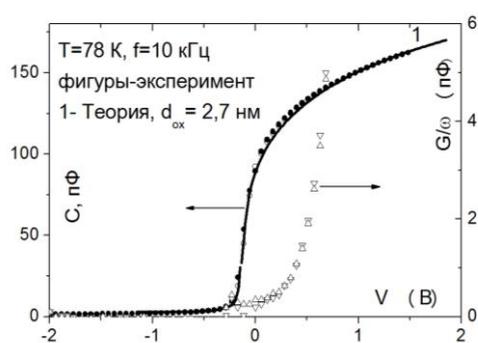


Рис.1. C-V и G-V характеристики.

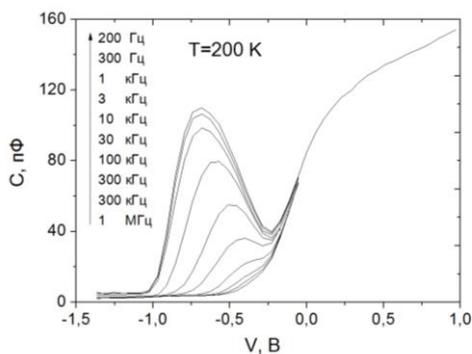


Рис.2. Особенность на C-V кривой.

в области обогачения от 0 до +1 В не имели насыщения, что связано с влиянием достаточно малой величины емкости области пространственного заряда  $C_{sc} \leq C_{ox}$ . В диапазоне частот 300 Гц – 300 кГц частотная дисперсия емкости не наблюдалась. Теоретическая C-V кривая, полученная с учетом квантования движения электронов в области обогачения соответствовала экспериментальной кривой. Плотность поверхностных состояний на границе раздела InAs/окисел была оценена величиной  $\sim 4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$  по пику малосигнальной проводимости. При отрицательных смещениях насыщение емкости не наблюдалось. С ростом напряжения величина емкости уменьшалась, что связано с туннельным вытягиванием неосновных носителей с поверхности InAs в металл через диэлектрическую пленку. С туннельным током также связан резкий рост проводимости в обогачении.

При температуре 77 К C-V кривые (рис.1) в области обогачения от 0 до +1 В не имели насыщения, что связано с влиянием достаточно малой величины емкости области пространственного заряда  $C_{sc} \leq C_{ox}$ . В диапазоне частот 300 Гц – 300 кГц частотная дисперсия емкости не наблюдалась. Теоретическая C-V кривая, полученная с учетом квантования движения электронов в области обогачения соответствовала экспериментальной кривой. Плотность поверхностных состояний на границе раздела InAs/окисел была оценена величиной  $\sim 4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$  по пику малосигнальной проводимости. При отрицательных смещениях насыщение емкости не наблюдалось. С ростом напряжения величина емкости уменьшалась, что связано с туннельным вытягиванием неосновных носителей с поверхности InAs в металл через диэлектрическую пленку. С туннельным током также связан резкий рост проводимости в обогачении.

С ростом температуры выше 100 К в области обеднения на C-V кривых появлялась частотно зависимая особенность в виде максимума (рис.2), которая связана с активацией процесса генерации неосновных носителей заряда. C-V- кривая стремится принять вид низкочастотной зависимости, однако вследствие высокой туннельной прозрачности окисла в приповерх-

ностной области InAs не может сформироваться инверсионный слой, поскольку дырки вытягиваются в затвор сквозь окисел. В рамках диффузионно-дрейфовой модели было проведено моделирование и определены параметры глубокого генерационного уровня, локализованного вблизи середины запрещенной зоны InAs. Предполагая, что уровень является кулоновским центром определена его концентрация  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

## Фоторезисторы из гетероэпитаксиальных структур CdHgTe на спектральный диапазон 8-12 мкм

В.В.Карпов, А.В.Филатов, Е.В.Сусов, Н.С.Кузнецов

ОАО «Швабе-Фотосистемы», Москва, 117545, Днепропетровский проезд 4А, стр.3А

тел. (495)315-73-56, эл.почта: [co-ckb@mail.ru](mailto:co-ckb@mail.ru)

Обобщены результаты разработки и промышленного производства фоторезисторов из гетероэпитаксиальных структур CdHgTe полученных молекулярно-лучевой эпитаксией (ГЭС КРТ МЛЭ) на спектральный диапазон 8-12 мкм для инфракрасной техники. Приведена конструкция охлаждаемых до криогенных температур многоэлементных фоторезисторов с фоточувствительными элементами (ФЧЭ) в топологии 2x16 и 2x32. Исследованы параметры фоторезисторов (вольтовая чувствительность и удельная обнаружительная способность) от рабочего напряжения смещения. Показано преимущество ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ по сравнению с ФЧЭ из объемных монокристаллов. Промышленная технология производства фоторезисторов обеспечивает величины удельной обнаружительной способности с учетом ухода параметров при повышенных рабочих температурах и фонового ограничения не менее  $4 \times 10^{10} \text{ смГц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$  для ФЧЭ с размерами площадок 0,05x0,05мм и не менее  $5 \times 10^{10} \text{ смГц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$  для 0,035x0,035мм во всех условиях эксплуатации. Приведена конструкция многоэлементных фоторезисторов в топологии пятиразрядного кода Грея с термоэлектрическим охлаждением (ТЭО) для регистрации импульсного лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм в диапазоне температур окружающей среды  $-50 \dots +55^\circ\text{C}$ . Исследованы зависимости отношения сигнал/шум от состава рабочего слоя ГЭС КРТ МЛЭ и конструкции фоторезистора. Достигнуто отношение сигнал/шум при облученности  $10^{-7} \text{ Дж см}^{-2}$  на длине волны 10,6 мкм в шумовой полосе  $\Delta f = 1 \text{ Гц}$  более  $1 \times 10^6$  при суммарной мощности потребления двухкаскадного ТЭО и ФЧЭ не более 10 Вт. Показано, что параметры ограничены выделяемой мощностью ФЧЭ. На основе базы данных по изготовленным и поставленным фоторезисторам из ГЭС КРТ МЛЭ, начиная с 2009г. проведена оценка их надежности по гамма-процентной наработке до отказа. Разработанная применительно к ГЭС КРТ МЛЭ технология изготовления ФЧЭ обеспечивает стабильность и сохраняемость параметров фоторезисторов в условиях хранения и эксплуатации не менее 12,5 лет.

## Матричные болометрические приемники в исследованиях на терагерцовом лазере на свободных электронах

Б.А. Князев<sup>1,2</sup>, В.В. Герасимов<sup>1,2</sup>, М.А. Демьяненко<sup>3</sup>, Д.Г. Есаев<sup>3</sup>,  
И.В. Марчишин<sup>3</sup>, А.А. Никитин<sup>2</sup>, Ю.Ю. Чопорова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. акад. Лаврентьева, 11

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

<sup>3</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. акад. Лаврентьева, 13

тел: (383) 329-4839, эл. почта: [B.A.Knyazev@inp.nsk.su](mailto:B.A.Knyazev@inp.nsk.su)

Исследования в области терагерцового излучения являются одним из перспективных направлений в современной физике. Этот спектральный диапазон, долгое время не использовавшийся, в последние годы привлекает внимание физиков, химиков, биологов и инженеров. Одним из важнейших направлений исследований в этом диапазоне является получение изображений, как в отраженном свете, так и в системах радиоскопии. Это связано, в частности с тем, что многие материалы, непрозрачные в видимом диапазоне, являются частично прозрачными в терагерцовом диапазоне.

После запуска в 2003 году Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) [1], первая очередь которого генерирует мощное (десятки и сотни Ватт) перестраиваемое по частоте излучения в диапазоне 90 – 240 мкм, появилась возможность продвинуть оптические методы исследования в терагерцовый диапазон. Основной проблемой при этом было практическое отсутствие устройств регистрации терагерцовых изображений, обладающих достаточно высокой чувствительностью и позволяющих регистрировать изображения в реальном времени.

Наиболее эффективным и удобным на сегодняшний день устройством для регистрации терагерцовых изображений оказался матричный микроболометрический приемник (ММБП), разработанный в ИФП СО РАН и адаптированный совместными с ИЯФ СО РАН усилиями для измерений в терагерцовом диапазоне [2]. Создано программное обеспечение для использования изображений ММБП в практических приложениях. К настоящему времени на рабочих станциях НЛСЭ работают три варианта ММБП различного размера и с разными входными окнами. С их помощью были впервые исследованы в терагерцовом диапазоне спеклы и продемонстрированы методы спекл-метрологии. Были получены изображения в отраженном и прошедшем свете. Впервые в этом диапазоне были реализованы методы классической голографии, причем особый интерес вызывает то, что размеры элементов матрицы оказываются меньше длины волны. Последнее позволяет также исследовать структуры с субволновыми размерами. С помощью ММБП впервые исследованы бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом, которые обещают открыть новую область применений терагерцового излучения.

### Литература

- [1] B.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov. Measur. Sci. Technol. **21**, 13 (2010).
- [2] M.A. Dem'yanenko, D.G. Esaev, B.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov. Appl. Phys. Lett. **92**, 131116 (2008).

## КМОП фотоприемник видимого диапазона формата 1,3 Мп

Д.В. Бородин<sup>1,2</sup>, Ю.В. Осипов<sup>1,2</sup>, В.В. Васильев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО "НПП "Пульсар", Москва

<sup>2</sup>ООО "РТК Инпекс", 141013, Мытищи, Силикатная ул., 39Д, rtcinprex@mail.ru

Разработан и передан в производство матричный 1,3 мегапиксельный 4/3" КМОП фотоприёмник формата 1280x1024 ячеек 13x13 мкм, предназначенный для приема оптического излучения в спектральном диапазоне 0,4-1,1 мкм. Параметры приемника приведены в таблице.

Наименование параметра, единица измерения		не менее
Напряжение насыщения, В		1,0
Интегральная чувствительность, В/(лк·с)		25
Филл-фактор, %		44
Зарядовая емкость, тысяч электронов		200
Частота кадров формата 1280×1024, Гц	при 16 выходах	400
	при 4 выходах	40
	при 1 выходе	6 - 10
Частота кадров при формате 512×1024, 16 выходов, Гц		1000

Режимы работы фотоматрицы [1]: конвейерный, с заданием времени интегрирования с кратностью времени вывода одной строки; мгновенная фотография с выводом после или во время интегрирования, или после интегрирования каждого активного "окна интереса" (до 4 окон), или неразрушающее считывание (до 15 кадров). Возможен переворот изображения по X/Y, режим ДКВ, прогрессивная или чересстрочная развертка с выводом информации параллельно на 1, 2, 4, 8 или 16 выходов. Задание времени интегрирования при "мгновенной фотографии" возможно не только длительностью внешнего импульса, но и цифровым кодом в интервале от 10 периодов до 2 миллионов периодов тактовой частоты. Управление всеми режимами выполняется через SPI порт.

По сравнению с предыдущими разработками, помимо увеличения формата и уменьшения размеров ячеек, значительно (в 4 - 5 раз) увеличена чувствительность и кадровая частота, расширены функциональные возможности.

В докладе будут представлены результаты измерений образцов.

### Литература

[1] Ю.В. Осипов, Д.В. Бородин, В.В. Васильев. СФ блок управления в составе КМОП СБИС матричных фотоприемников видимого диапазона. Материалы X НТК "Системы ДЗЗ", МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2013 г.

## Состояние развития тепловизионных модулей и приборов в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ»

Г.Е. Журов, Е.А. Крапивко, И.И. Кремис, **В.Н. Федоринин**, М.Ю. Цивинский,  
С.М. Чурилов, П.И. Шапор, К.П. Шатунов  
Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, 630090, просп. Лаврентьева 2/1  
тел: (383) 330-6559, факс: (383) 330-9106, эл. почта: *ktipm@oesd.ru*

В докладе рассмотрены конструкции тепловизионных приборов и модулей на основе охлаждаемых и не охлаждаемых фотоприемников, разработанных в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» за последнее время. Приведены основные характеристики разработанных изделий.

Разработан тепловизионный модуль, включающий в себя матричное фотоприемное устройство (МФПУ) и модуль электронной обработки (МЭО). Модуль унифицирован по напряжению питания, выходному видеосигналу, посадочным и присоединительным размерам и массо-габаритным характеристикам. В модуле могут применяться МФПУ для спектральных диапазонов 3-5 или 8-12 мкм с форматом фотоприемников 640×512 или 320×256 элементов, разработанных и изготовленных в ИФП СО РАН. В модуле реализована двухточечная коррекция теплового изображения и автоматический поиск и деселекции дефектных элементов ФПУ в реальном масштабе времени. Тепловизионный модуль найдет применение в оптико-электронных каналах различного назначения, в системах наблюдения, разведки и прицеливания различных видов базирования.

Разработана модернизированная тепловизионная камера ТПК-ЗР на базе ФПУ ФЭМ10М размерностью 4×288 элементов производства ФГУП «НПО «Орион». В камере реализованы технические и технологические решения, позволяющие обеспечить автоматическую деселекцию дефектных элементов ФПУ и компенсацию остаточного геометрического шума в тепловом изображении. Камера ТПК-ЗР успешно прошла испытания в ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» в составе системы применения. Результаты испытаний показали, что камера ТПК-ЗР не уступает по своим характеристикам прибору аналогу на базе ФПУ IDTL 06306 производства фирмы «Sofradbr», Франция.

Разработана малогабаритная, мало потребляющая неохлаждаемая тепловизионная камера (НТпК) на основе микроболометрической матрицы размерностью 640×480 с шагом 17 мкм. Малое энергопотребление (не более 1 Вт при передаче видеопотока через порт USB) достигнуто за счёт использования современной элементной базы, схемотехнических решений и применения универсальной реконфигурируемой вычислительной платформы [1], оптимизированной для использования во встраиваемых малопотребляющих системах с высокими требованиями к вычислительным ресурсам, работающих в масштабе реального времени.

Разработанная НТпК способна использовать в качестве интерфейса с внешним окружением различные высокоскоростные цифровые каналы, в частности, High-Speed USB 2.0, Super-Speed USB 3.0, 1G Ethernet (стек UDP/IP), обеспечивающие передачу видеопотока на полной кадровой скорости без сжатия.

### *Литература*

[1] Г.Е. Журов, М.Ю. Цивинский. Универсальная модульная реконфигурируемая система для обработки сигналов тепловизионных и многоканальных приборов в реальном времени. *Известия вузов. Приборостроение*. 2014, Том 57, №5. стр. 44-46 (2014).

## Спектральные характеристики фотодиодов КМОП матричного фотоприемника видимого диапазона формата 256 × 256 элементов

В.В. Карпов<sup>1</sup>, В.П. Астахов<sup>1</sup>, М.Е. Козырев<sup>1</sup>, **В.Ф. Чишко**<sup>1</sup>, В.И. Петренко<sup>1</sup>,  
В.И. Семенов<sup>1</sup>, Д.В. Бородин<sup>2</sup>, Ю.В. Осипов<sup>2</sup>, В.В. Васильев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Швабе-Фотосистемы», Москва, 117545, Днепронетровский проезд 4А, стр.3А  
тел: (495) 315-73-60, эл. почта: [otdel212@mail.ru](mailto:otdel212@mail.ru)

<sup>2</sup>ООО "РТК Иннекс", 141013, МО, Мытищи, ул. Силикатная, 39Д

Исследованы спектральные характеристики и чувствительность фотодиодов двух различных топологий в составе КМОП матричного фотоприемника, разработанного ООО «РТК Иннекс» [1]. Фотоматрица разработана на основе четырехтранзисторных ячеек с размером ячеек 30х30 мкм<sup>2</sup>. В качестве фотодиода использовались два параллельно включенных и расположенных друг под другом р-п-перехода (поверхностный: р<sup>+</sup>-исток - п-карман и заглубленный: п-карман - р-подложка). В первом варианте площадь р<sup>+</sup>-п -перехода составляла  $A_{p^+-n} = 552$  мкм<sup>2</sup> при площади N-кармана  $A_N = 616$  мкм<sup>2</sup>.

Во втором варианте -  $A_{p^+-n} = 44$  мкм<sup>2</sup> и  $A_N = 64$  мкм<sup>2</sup>. Интегрирование сигнала происходит на собственной емкости фотодиодов. Установлено, что в фотодиодах с топологией первого варианта максимум спектральной чувствительности находится при  $\lambda \approx 0,5$  мкм и квантовая эффективность составляет  $\eta \approx 0,4$  для непросветленной поверхности фотодиода. Фотодиоды с топологией второго варианта имеют максимум спектральной чувствительности при  $\lambda \approx 0,85$  мкм для непросветленной поверхности фотодиода. Обсуждается влияние различных механизмов на формирование спектра фоточувствительности и величину квантовой эффективности исследованных фотодиодов.

### Литература:

[1] Материалы VIII научно-технической конференции "Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли" ("Системы ДЗЗ-2011»), МНТОРЭС им. А.С.Попова, Москва 2011 г., с.269-270.

## Фотоприёмники с полупроводниковыми ОЭС – фотокатодами на спектральные диапазоны в интервале 200 - 1100 нм

А.А. Емельянов<sup>1</sup>, А.Г. Викулов<sup>1</sup>, С.В. Гамзинов<sup>1</sup>, А.В. Долгих<sup>1</sup>, И.И. Гольдберг<sup>1</sup>,  
В.И. Локтионов<sup>1</sup>, А.А. Мармалюк<sup>2</sup>, А.А. Падалица<sup>2</sup>, А.Ю. Андреев<sup>2</sup>,  
А.В. Мазалов<sup>2</sup>, В.В. Бакин<sup>3</sup>, Д.В. Горшков<sup>3,4</sup>, С.Н. Косолюбов<sup>3</sup>,  
С.А. Рожков<sup>3,4</sup>, Г.Э. Шайблер<sup>3</sup>, **А.С. Терехов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ОАО «Катод», ул. Падунская, 3, Новосибирск, 630047, Россия.

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

<sup>3</sup>ИФП СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия.

<sup>4</sup>НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия.

тел: (383)330-98-74, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [terek@isp.nsc.ru](mailto:terek@isp.nsc.ru)

Существует обширный класс задач, для решения которых необходимы фотоприёмники, обладающие большой площадью фоточувствительной поверхности, субнаносекундным временным разрешением, однофотонной чувствительностью, высокой радиационной стойкостью и пространственным разрешением. Несмотря на огромные успехи в разработках твердотельных фотоприёмников, некоторые из перечисленных выше требований им принципиально недоступны и для решения соответствующих задач используются фотоэмиссионные фотоприёмники (ФЭФ). Наиболее эффективными являются вакуумно-полупроводниковые планарные ФЭФ, в которых плоский полупрозрачный фотокатод (ФК), сборка микроканальных пластин (МКП) и детектор электронов установлены параллельно друг другу в металлокерамическом корпусе с экстремально-высоким вакуумом. В данной работе обсуждаются конструкции и характеристики унифицированных планарных ФЭФ с полупрозрачными полупроводниковыми ФК с отрицательным электронным сродством, разработанных на основе гетероэпитаксиальных структур с фоточувствительными слоями из InGaAs, GaAs, GaAsP и GaN. Разработанные фотокатоды обеспечивают возможность регистрации излучений и изображений в спектральном диапазоне от 200 до 1100 нанометров с высоким пространственным и временным разрешением. Разработаны конструкции ФЭФ, необходимые технологии и соответствующее оборудование, обеспечивающие возможность изготовления разнообразных одноканальных и многоканальных фотоприёмников с рабочими диаметрами фотокатодов от 10 до 25 миллиметров. Среди прочих, разработаны два типа ФЭФ для регистрации изображений. В ФЭФ первого типа используются ЭОП и люминофорный экран на волоконно-оптическом диске, вблизи внешней поверхности которого на расстоянии в единицы микрон установлена «безоконная» ПЗС - или КМОП – матрица. В зависимости от числа МКП, установленных в ЭОП, и от приложенного к ним напряжения, возможна регистрация изображений как в «аналоговом» режиме, так и в режиме регистрации одиночных фотонов. В ФЭФ второго типа установлены две МКП, а для регистрации электронов используется многоканальный кодирующий коллектор, позволяющий с помощью специального электронного модуля регистрировать изображение в режиме счёта одиночных фотонов.

## Информационное обеспечение систем наблюдения распределенных роботизированных комплексов

С.М. Борзов<sup>1</sup>, А.В. Голицын<sup>2</sup>, Б.С. Долговесов<sup>1</sup>, **О.И. Потатуркин<sup>1</sup>**, М.Н. Филиппов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматике и электрoметрии СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр-т. акад. Коптюга, 1

<sup>2</sup> Новосибирский филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ»,  
Новосибирск, 630090, пр-т. акад. Лаврентьева, 2/1.

тел: 8(383) 330-4020, факс: 8(383) 330-8878, эл. почта: [potaturkin@iae.nsk.su](mailto:potaturkin@iae.nsk.su)

При проведении боевых и антитеррористических операций, а так же мероприятий по устранению ЧС, целесообразно использование распределенных роботизированных комплексов. Однако открытым вопросом остается их эффективное информационное обеспечение. Условия, в которых приходится проводить действия, являются крайне сложными, для них характерно наличие шума, огня, дыма и высокой температуры. В этой ситуации, очень сложно понимать свое местоположение, и обосновано принимать решения о целесообразности тех либо других действий как рядовым персоналом, так и руководством операцией.

Данный доклад посвящен:

- методам обработки многокурсных изображений, получаемых с различных приборов наблюдения, с созданием единого информационного поля;
- методам позиционирования роботов и персонала;
- методам формирования информативных изображений и форм их представления.

Наиболее надежными источниками информации для уточнения обстановки являются изображения, формируемые стационарными и подвижными датчиками различных спектральных диапазонов, находящихся в зоне действия. Основными задачами является обнаружение людей, определение препятствий для передвижения, а также выявление потенциально опасных объектов и слежение за изменением их состояния во времени. Ограниченная разрешающая способность датчиков, наличие шумов регистрации, сложная обстановка, а в некоторых случаях и применение специальных средств маскирования существенно осложняют решение этих задач. Улучшение эффективности функционирования систем наблюдения достигается, в частности, посредством специализированной математической обработки изображений и совместного анализа данных различных каналов с целью выделения значимых компонент сигналов.

Работа в помещении делает невозможным постоянное использование спутниковых навигационных систем (GPS, GLONASS и др.), поэтому наиболее перспективным методом определения координат персонала в контексте рассматриваемой задачи является применение компактных инерциальных навигационных систем на основе акселерометров и гироскопов, которая также включает контуры коррекции ошибок по дополнительным комплексированным данным с помощью фильтра Калмана.

Одним из принципиальных факторов сдерживающих внедрение данного подхода является также недостаточное развитие адекватных задачам методов анализа данных и форм представления информации конечным пользователям. В докладе предлагаются методы интегрирования многокурсных и мультиспектральных данных, получаемых с различных приборов наблюдения, со встраиванием реальной информации в существующую 3D модель сцены.

## Исследование влияния локальной атомной и электронной структуры нанокompозитов $\text{ZnS}:\text{Cu}@\text{Al}_2\text{O}_3$ на их фотоэлектрические свойства

А.И. Чукавин<sup>1</sup>, Р.Г. Валеев<sup>1</sup>, А.Н. Бельтюков<sup>1</sup>, В.В. Кривенцов<sup>2</sup>, А.Л. Тригуб<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт УрО РАН, 426000, г. Ижевск, ул. Кирова 132

<sup>2</sup> Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева 5

<sup>3</sup> НИЦ Курчатовский институт, Москва, 123182, пл. Академика Курчатова 1  
тел: 8(963)541-10-07, факс: 8(3412) 72-25-29, эл. почта: andrey\_chukawin@mail.ru

В настоящее время исследования в области электролюминесцентных материалов направлены как на получение новых, более эффективных люминофоров, так и на повышение функциональных характеристик люминофоров на базе сульфида цинка [1-3]. Сульфид цинка, легированный медью, является одним из первых и самых эффективных материалов для электролюминесцентных источников света. Свечение в данном материале обусловлено созданием в результате химического взаимодействия гетеропереходов типа  $n(\text{ZnS}:\text{Cu})\text{-}p(\text{Cu}_2\text{SZn})\text{-}n(\text{ZnS}:\text{Cu})$ , обладающих эффективной эмиссией люминесценции. Порошки и пленки на основе  $\text{ZnS}:\text{Cu}$  широко используются для создания на их базе люминесцентных панелей, устройств символьного отображения информации и других приложениях, однако, их генерационные характеристики (яркость и длина волны излучения), а также время непрерывной эффективной работы заметно проигрывают по сравнению со светодиодами.

В данной работе предлагается новый материал, который может быть использован в качестве люминофора в электролюминесцентных источниках света: легированный медью сульфид цинка, осажденный методом вакуумно-термического осаждения в матрицы анодного оксида алюминия. Предполагается, что когерентное сложение излучения большого массива наночастиц, каждая из которых будет представлять индивидуальный источник излучения, значительно повысит яркость излучения с одновременным уменьшением энергопотребления.

Полученные нанокompозиты были исследованы методами рентгено-фотоэлектронной спектроскопии, рентгеновской дифракции, а локальное атомное окружение вокруг атомов Zn и Cu – методами EXAFS и XANES-спектроскопии. Люминесценция исследована методом УФ-люминесцентной спектроскопии.

Работы выполнялись при финансовой поддержке РФФИ (грант №15-19-10002).

### Литература

- [1] Ummartyotin S., Bunnak N., Juntaro J., Sain M., Manuspiya H., Solid State Sciences **14**, 299-304 (2012).
- [2] Li Y., Zhou S., Chen Z., Yang Y., Chen N., Du G., Ceramics International **39**, 5521-5525 (2013).
- [3] Adachi D, Takei K, Toyama T, Okamoto H., J. Appl. Phys. **47**, 83–86 (2007).

## **Частотно-селективная диагностическая система для абсолютных измерений электромагнитного излучения в интервале от миллиметровых волн до терагерцового излучения**

**А.В. Аржанников**, И.А. Иванов, С.А. Кузнецов, В.Ф. Скляр  
Новосибирский государственный университет  
Институт ядерной физики СО РАН

Дано описание многоканальной диагностической системы для абсолютных измерений в частотном интервале от 100 ГГц до 1.5 ТГц, которая составлена из частотно-селективных регистрирующих узлов, состоящих из широкополосных регистраторов излучения и узкополосных фильтров. Роль регистраторов излучения выполняют полупроводниковые детекторы и болометры.

В частности, в диапазоне частот от 400 до 700 ГГц используются болометры, производимые компанией TeraSense, которые имеют временное разрешение масштаба единиц наносекунд. Приведены частотные зависимости абсолютной чувствительности этих регистраторов, которые различаются для разных образцов. Для обеспечения необходимого спектрального разрешения у частотно-селективных узлов диагностической системы, перед этими болометрами установлены узкополосные пропускающие фильтры. Фильтры созданы на основе стоящих друг за другом тонких частотно-селективных пленок, что обеспечивает высокую степень подавления потока излучения, проходящего на регистратор вне полосы пропускания фильтра. Приводятся частотные характеристики фильтров. Описана процедура характеристики абсолютной чувствительности в заданных частотных рабочих интервалах. Описана диагностическая система, построенная на объединении частотно-селективных регистрирующих узлов в единый полихроматор.

Данные исследования имеют финансовую поддержку от РФФИ в рамках проекта №14-12-00610 и по контракту с Минобнаукой РФ №3002.

## Элемент неохлаждаемой мегапиксельной тепловизионной матрицы на основе тонких пироэлектрических пленок

Э.Г. Косцов, С.Д. Иванов

ФГБУН Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, пр. академика Коптюга, д.1  
тел: (383) 330-79-86, факс: (383) 330-88-78, эл. почта: [kostsov@iae.nsk.ru](mailto:kostsov@iae.nsk.ru)

Несмотря на очевидные успехи в разработке и создании неохлаждаемых тепловизионных матриц на основе теплоизолированных микроболометров, их существенное развитие уже не представляется очевидным. К настоящему времени исчерпаны основные резервы дальнейшего улучшения их основных параметров: по увеличению теплоизоляции активного слоя,  $R_T$ , величины ТКС, степени заполнения фокальной плоскости, поглощения энергии ИК - излучения и уменьшению сопротивления микроболометра.

Рассматривается новый подход к построению теплового элемента мегапиксельных неохлаждаемых матриц для регистрации излучения ближнего и дальнего ИК – диапазона. Он основан не на традиционном накоплении тепла в объеме элемента за время кадра, а на накоплении заряда в пироэлектрической пленке, ПП, на каждом такте модуляции излучения. Элемент не теплоизолируется, а ПП размещается непосредственно на поверхности подложки, обладающей высокой температуропроводностью, обеспечивающей быстрое и эффективное охлаждение пироэлектрика за время между тактами его облучения, оптимальное время облучения определяется толщиной ПП,  $d$ , и составляет  $\sim 2d^2/\chi$ . ( $\chi$  - температуропроводность материала ПП). В элементе отсутствуют непродуктивные потери энергии излучения, связанные с наличием мембраны или теплостоков и практически вся энергия излучения превращается в заряд, как в процессе нагрева активного слоя, так и при его охлаждении. Это обеспечивает значительно более высокую, по сравнению с известными аналогами, чувствительность элемента, высокое значение  $D^*$ .

Разработана новая конструкция элемента ИК- матрицы, которая по сравнению с теплоизолированными элементами существенно более простая, при ее создании необходимо значительно меньшее число технологических операций, что определяет возможность построения мегапиксельной матрицы с размерностью  $1500 \times 1500$  и более пикселей, при этом возможно достижение коэффициента заполнения элементами поверхности матрицы близкое к 100%. Представлены основные электрофизические параметры элемента пикселя с размерами  $12 \times 12$  мкм. Показано, что такие элементы, при  $d = 0.5 - 3$  мкм, обладают в режиме накопления заряда удельной обнаружительной способностью выше  $10^9$  см.Гц<sup>1/2</sup> Вт<sup>-1</sup>.

Рассматривается специфика функционирования элементов и технология создания мегапиксельной матрицы, способной формировать кадр с частотой до 100 Гц и выше. Описывается новый принцип высокоскоростной модуляции ИК - излучения.

Экспериментально установлено, что величина пироэлектрического коэффициента в пленках  $SbN$ ,  $Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6$ , достигает значений  $1 - 2 \times 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>град.

### Литература

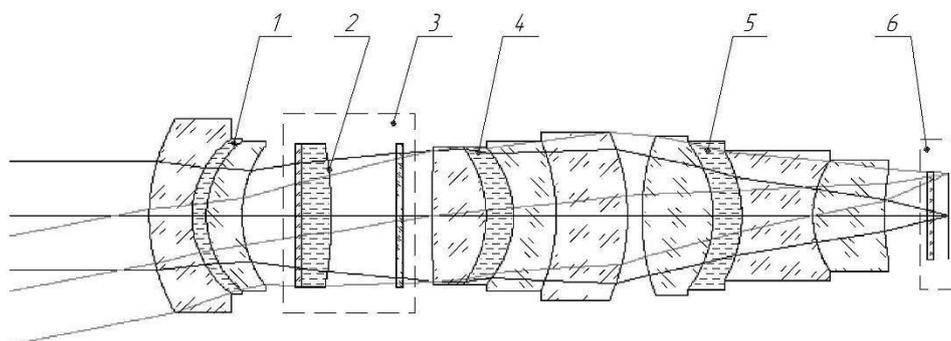
- [1] Э.Г. Косцов, Микроэлектронные тепловизионные системы на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Микроэлектроника, 1996, N 3, с. 177 -186.
- [2] E.G. Kostsov, Ferroelectric barium-strontium niobate films and multi-layer structures, Ferroelectrics, 314, pp.169-187, 2005.

## Электроуправляемый широкоспектральный объектив с жидкостными линзами

А.В. Голицын

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, 630090, просп. Акад. Лаврентьева, 2/1  
тел: (383) 333-17-01, эл. почта: golitsyn@oesd.ru

Разработан объектив для цифровых очков ночного видения на базе низкоуровневой ПЗС камеры, использующий для фокусировки изображения жидкостную линзу с электромагнитным актюатором. Особенности применения диктуют высокое относительное отверстие, необходимость полного использования светового потока в широком спектральном диапазоне кремниевого фотоприемника 0.45-1 мкм и возможность быстрой автофокусировки под управлением ТВ камеры от 30 см до бесконечности



Объектив содержит 8 твердотельных линз, одну электроуправляемую жидкостную (ЭУ ЖЛ) линзу и три жидкостных линзы (ЖЛ) с фиксированной оптической силой, организованных в четыре компонента разделенных воздушными промежутками.

Для решения задачи быстрой фокусировки, используется жидкостная линза способная изменять профиль поверхности ограниченной эластичной мембраной под воздействием электромагнитного актюатора. Вторая поверхность линзы формируется плоской стеклянной пластиной. Под воздействием гидростатического давления создаваемого актюатором, мембрана изменяет радиус и, соответственно – оптическую силу компонента в пределах 12 диоптрий. В качестве оптического материала используется фторорганическую жидкость ( $n_d=1.3$ ,  $\nu_d=105$ ) с дисперсией показателя преломления меньшей, чем у флюорита кальция. Время установки из крайних положений оптической силы составляет 15 мс.

Неуправляемые ЖЛ выполняют задачи компенсации вторичного спектра в широком спектральном диапазоне 0.45-1 мкм и сопряжения стекол с оптическими кристаллами, отличающимися коэффициентом температурного расширения в три раза, без потери светопропускания. В качестве рабочего материала используются две жидкости (1.4/51 и 1.55/20).

Качество изображения соответствует фотоприемной матрице ПЗС 1200x960 с шагом 3.8 мкм в диапазоне фокусировки от бесконечности до 280 мм. При фокусировке на бесконечность поле зрения составляет 14x18 градусов.

## **Методы и средства эллипсометрической диагностики материалов и структур нанополупроводников**

Рыхлицкий С.В., Спесивцев Е.В., Швец В.А.,  
Пчеляков О.П., Соколов Л.В., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н.  
Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, просп. ак. Лаврентьева, 13  
*тел: 8(383) 330 87 16; e-mail: evs@isp.nsc.ru*

Метод эллипсометрии выгодно выделяется на фоне других методов исследования физических свойств чистой поверхности материалов и слоистых поверхностных наноструктур фотоники своей высокой информативностью и универсальностью, благодаря присущим ему рядом уникальных свойств. Эллипсометрия — это неразрушающий, невозмущающий, экспрессный и бесконтактный метод диагностики, основанный на анализе состояния поляризации отраженного от образца света. Эллипсометрические измерения несут информацию об оптической структуре приповерхностной области и тех процессах, которые влияют на ее оптические свойства. Поэтому методом эллипсометрии можно с высокой точностью измерять толщины многослойных покрытий, кристаллическую структуру и состав материалов, изучать переходные слои, исследовать адсорбционные процессы на границе раздела фаз и многое другое.

В ИФП СО РАН разработана и запатентована оригинальная статическая схема эллипсометрических измерений, которая обладает рекордно высокими показателями по быстродействию и чувствительности. В этой схеме отсутствуют подвижные элементы и модуляция сигналов. На ее основе были разработаны и созданы прецизионные эллипсометры различного функционального назначения.

В настоящее время эллипсометрия находит широкое применение в различных областях фотоники от научных исследований до наукоемкого производства. Благодаря высокой чувствительности и стабильности лазерной (одноволновой) эллипсометрии удается выращивать эпитаксиальные наноструктуры с очень высокой точностью и однородностью по составу.

Спектральная эллипсометрия является наиболее информативным методом исследования оптических спектров материалов фотоники, их поверхностных свойств, и свойств неоднородных структур. Метод широко применяется для исследования особенностей зонной структуры полупроводников, диэлектриков и металлов. Измеренные спектры эллипсометрических параметров характеризуют кристаллическое совершенство материалов, наличие тех или иных включений, поверхностных и переходных слоев, шероховатости поверхности и т.п.

Эллипсометрия высокого пространственного разрешения успешно применяется в процессе контроля поверхностных микро- и наноструктур различного назначения, например, для выявления поверхностных микродефектов на подложках, измерения неоднородности структур, качества травления окисла в окнах на рабочих чипах и т.д.

В докладе подробно рассматриваются конструктивные особенности разработанной в ИФП СО РАН современной эллипсометрической аппаратуры различного назначения и приводятся многочисленные примеры экспериментальных измерений новых перспективных материалов и структур нанополупроводников.

## Получение гетероструктур InAsSb методом МЛЭ с применением различных молекулярных форм As

Е.А. Емельянов, А.В. Васев, Б.Р. Семягин, А.П. Василенко, А.А. Команов,  
А.К. Гутаковский, М.А. Путято, В.В. Преображенский  
ИФП СО РАН, Новосибирск, 630099, пр. ак. Лаврентьева 13  
тел: (383)333-19-67, факс: (383)333-75-02, эл. почта: [e2a@isp.nsc.ru](mailto:e2a@isp.nsc.ru)

Твёрдые растворы  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$  привлекают внимание из-за возможности создания на их основе оптоэлектронных приборов ИК диапазона, чувствительных в плоть до длин волн порядка 12,4 мкм. Однако существует ряд трудностей связанных с получением высококачественных эпитаксиальных слоёв  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ . Одной из них является отсутствие подложечного материала для всего спектра составов  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$  [1].

Другой проблемой является формирование слоёв с заданным составом в подрешетке V группы. Состав твердого раствора зависит как от величин потоков молекул сурьмы и мышьяка, так и от коэффициентов их встраивания  $S_{\text{Sb}}$  и  $S_{\text{As}}$ .  $S_{\text{Sb}}$  и  $S_{\text{As}}$  являются функциями температуры подложки ( $T_s$ ), величины и соотношения молекулярных потоков элементов III и V групп, молекулярной формы элементов пятой группы в потоке [2].

Целью нашей работы было экспериментальное исследование влияния молекулярной формы мышьяка на состав плёнок твёрдых растворов  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ , выращенных на подложках GaAs(001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Серия образцов выращивалась при разных значениях  $T_s$ . Каждый образец состоял из двух слоёв. Первый слой выращивался с использованием потока молекул  $\text{As}_2$ . После чего рост останавливался и температура зоны крекинга источника мышьяка снижалась с 950°C до 400°C для генерации потока молекул  $\text{As}_4$ . Затем выращивался второй слой твёрдого раствора с использованием потока молекул  $\text{As}_4$ , эквивалентным в атомарном выражении потоку  $\text{As}_2$ .

Выращенные образцы были исследованы методами рентгеновской дифрактометрии и ПЭМ. Определены  $S_{\text{As}_4}$  и  $S_{\text{As}_2}$  при различных  $T_s$ . Было установлено, что  $S_{\text{As}_4}$  в большей степени зависит от  $T_s$  по сравнению с  $S_{\text{As}_2}$ , что связано с различием в механизмах взаимодействия молекул  $\text{As}_4$  и  $\text{As}_2$  с поверхностью роста при МЛЭ [3]. Было обнаружено, что при низкой температуре роста ступенчатое увеличение доли Sb в пленке  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$  приводит к уменьшению плотности дислокаций в слое с меньшим x. При этих условиях происходит формирование сетки чисто краевых дислокаций (interfacial misfit (IMF) array) несоответствия, лежащей на границе раздела слоев [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ – 14-02-31054

### Литература

- [1] H. Gao, W. Wang, Z. Jiang, L. Liu, J. Zhou, H. Chen., J. Cryst. Growth, 308, 406, (2007).
- [2] А.Н. Семенов, В.С. Сорокин, В.А. Соловьев, Б.Я. Мельцер, С.В. Иванов ФТП, 38, 3, 278, (2004).
- [3] Е.А. Емельянов, Д.Ф. Феклин, А.В. Васев, М.А. Путято, Б.Р. Семягин, А.П. Василенко, О.П. Пчеляков, В.В. Преображенский, «Автометрия» 47, 34, (2011).
- [4] S. H. Huang, G. Balakrishnan, M. Mehta, A. Khoshakhlagh, L. R. Dawson, D. L. Huffaker, and P. Li Appl. Phys. Lett. 90, 161902 (2007)

## ДБЭО исследования начальных стадий роста слоев InSb при МЛЭ

А.К. Бакаров<sup>1,2</sup>, К.С. Журавлев<sup>2</sup>, А.И. Торопов<sup>1</sup>, Т.А. Левцова<sup>1</sup>,  
Н.А. Валишева<sup>1</sup>, А.С. Кожухов<sup>1,2</sup>, Д.В. Щеглов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Лаврентьева, 13,  
Новосибирск, 630090, Россия.

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2,  
Новосибирск, 630090, Россия.

тел: (383)330-69-45, факс: (383)330-27-71, эл. почта: [bakarov@isp.nsc.ru](mailto:bakarov@isp.nsc.ru)

Оптимизация процессов эпитаксиального роста узкозонных соединений на основе антимонида индия с целью создания высокосовершенных эпитаксиальных слоев с высокими значениями и однородностью фоточувствительных параметров до сих пор является актуальной задачей для создания матричных ИК-фотоприемных устройств на спектральный диапазон 3–5 мкм.

Экспериментальные структуры синтезировались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в установке Comrast-21T. В работе методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) исследованы процессы десорбции окислов с поверхности и начальные стадии роста слоев InSb на нелегированных подложках InSb(100). Использовались

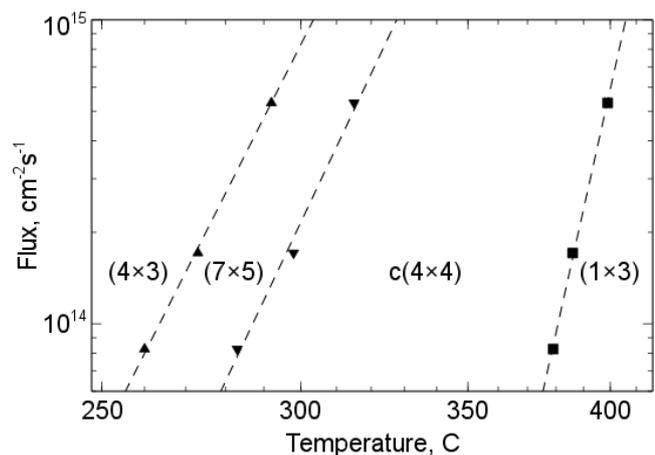


Рис. 1. Статическая фазовая диаграмма поверхности (100) InSb

при росте пленок в условиях существования сверхструктуры псевдо (1x3) формируется упорядоченная ростовая поверхность, образуемая террасами с моноатомными ступенями, что подтверждается расщеплением зеркального рефлекса в азимуте [110] на картинах ДБЭ. Понижение ростовой температуры приводит к существенному огрублению поверхности ( $R_{ms} < 4,25$  нм).

Концентрация доноров в эпитаксиальных слоях определялась по величине емкости на плато высокочастотной емкости в инверсии и составляет величину  $N_d \sim 1 - 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Исследования выполнены при поддержке соглашения о предоставлении субсидии Минобрнауки РФ RFMEFI60414X0134.

пластины после химико-динамической обработки и после дополнительного травления в 21%  $C_4H_6O_6:H_2O_2:HF=6,3:80:-125$ . Калибровка молекулярных потоков материалов осуществлялась по ионизационному вакуумметру и осцилляциям интенсивности зеркального рефлекса в ДБЭО. На рис.1 представлена статическая фазовая диаграмма (когда поверхность находится только в потоке Sb) сверхструктурных переходов на поверхности InSb(100).

Показано, что отношение потоков  $Sb/In=1,4:1$  и температура подложки  $410^\circ\text{C}$  являются оптимальными параметрами для выращивания атомарно гладких пленок с шероховатостью  $R_{ms} < 0,15$  нм. При этом

# Условия формирования нанокристаллов и нанокольцев GaAs методом капельной эпитаксии (Монте-Карло моделирование)

М.А. Василенко<sup>1,2</sup>, И.Г. Неизвестный<sup>1,2</sup>, Н.Л. Шварц<sup>1,2</sup>

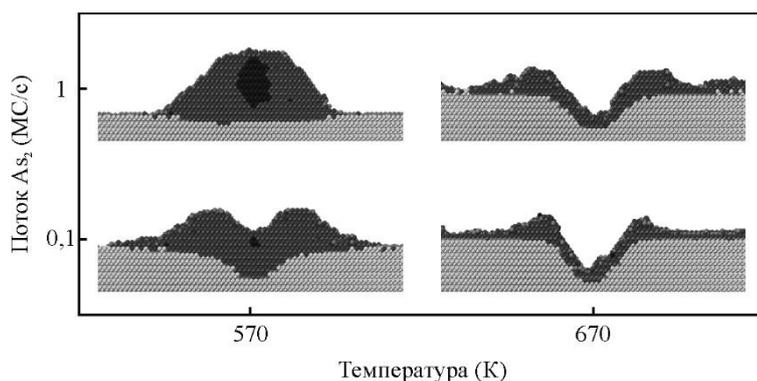
<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского Отделения РАН, Новосибирск, 630090, пр-т Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск, 630073, пр-т К. Маркса, 20

тел: (383) 333-1475, факс: (383) 333-2771, эл. почта: [vasilenkonksk1992@gmail.com](mailto:vasilenkonksk1992@gmail.com)

Интерес к наноструктурам на основе соединений  $A_3B_5$  обусловлен перспективой их применения в современных оптоэлектронных приборах. Квантовые точки и нанокольца используются в качестве элементов фотодетекторов, светоизлучающих приборов и солнечных элементов [1]. Метод капельной эпитаксии (КЭ) является подходящей технологией для создания структур различной морфологии на основе соединений  $A_3B_5$  [2]. Оптические свойства наноструктур зависят от их размера и формы. Монте-Карло (МК) моделирование может оказаться полезным при выборе условий роста наноструктур заданной морфологии.

Ранее методом МК моделирования при изучении влияния подложки на морфологию наноструктур было показано, что образование нанотверстий и нанокольцев методом КЭ возможно только на подложках с ориентацией поверхности (001) [3]. В настоящей работе пред-



ставлены результаты МК моделирования роста GaAs нанокристаллов и нанокольцев на подложках GaAs(100). В зависимости от температуры и потока мышьяка в результате кристаллизации капель галлия могут быть образованы: компактные трехмерные кристаллы, нанокристаллы с жидким ядром галлия внутри, нанокольца и нанотверстия (Рис). Была проанализирована кинетика форми-

рования нанокольцев. Анализ результатов моделирования позволил выявить атомные процессы, ответственные за различия в морфологии выращенных структур.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (№ 14-02-00776-а) и программ РАН.

## Литература

- [1] J. Wu, Z.M. Wang, V.G. Dorogan, Sh. Li, Zh. Zhou, H. Li, J. Lee, E.S. Kim, Y.I. Mazur, G.J. Salamo, *APL* **101**, 043904 (2012).
- [2] C. Somaschini, S. Bietti, S. Sanguinetti, N. Koguchi, A. Fedorov, *Nanotechnology* **21**, 125601 (2010).
- [3] M.A. Vasilenko, I.G. Neizvestny, N.L. Shwartz, *Comput. Mater. Sci.* **102**, 286 (2015).

# Нанорешеточный световой фильтр большой площади, изготовленный с помощью наноимпринт-литографии

А.Е. Гайдук, В.А. Селезнёв, С.Н. Речкунов, В.Я. Принц.  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090,  
Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13  
тел: (383)333-06-99, эл. почта: [aegayduk@isp.nsc.ru](mailto:aegayduk@isp.nsc.ru)

Улучшение изображения, формируемого матрицами фотодетекторов и устройств ночного видения можно достичь, выделив из всего спектра излучения заданную область. Цветовые фильтры, основанные на использовании плазмонного резонанса и резонанса Фабри-Перо, позволяют выделять узкие спектральные диапазоны, положение которых определяется параметрами резонатора Фабри-Перо. В настоящей работе демонстрируется технология формирования цветных фильтров большой площади, изготовленных с помощью наноимпринт-литографии. Схематичный вид предлагаемой структуры представлен на рис.1а. Фильтр представляет собой многослойную гибкую структуру, состоящую из толстого (100 нм) слоя золота, выполняющего роль отражателя, диэлектрической решетки с периодом 190 нм, глубиной рельефа 155 нм и поверхностной золотой металлизацией толщиной 30 нм. При освещении естественным светом, структура имеет ярко выраженный красный цвет. Размер фильтра превысил 180 см<sup>2</sup>. Как показали измерения на атомно-силовом микроскопе, параметры рельефа воспроизводятся с высокой точностью по всему образцу.

Моделирование спектральных характеристик было выполнено с помощью метода конечных интегрирований с периодическими граничными условиями. В спектре отражения ТЕ-волн присутствуют резкие провалы вследствие резонанса Фабри-Перо в гребнях решетки. Их положение можно регулировать, изменяя глубину рельефа (увеличивая длину резонатора), либо модифицируя фактор заполнения (за счет изменения эффективного показателя преломления резонатора). В спектрах отражения ТМ-волн (рис.1б) кроме резонанса Фабри-Перо проявляется локализованный плазмонный резонанс в виде широкополосного пика на длинах волн 500-800 нм в зависимости от ширины металлических полос. Если положения резонансов перекрываются, коэффициент отражения структуры остается высоким (около 0,8), поскольку лишь малая доля света проходит в диэлектрический слой решетки вследствие плазмонного резонанса (рис. 1б).

Работа поддержана граном РФФ.

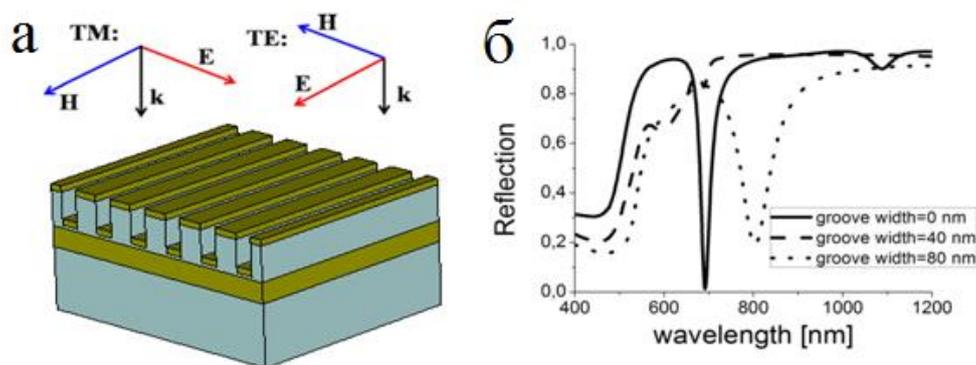


Рис.1. а) схематичное изображение фильтра б) расчетные спектры отражения фильтра для разных значений ширины канавки.

## Синтез гетероструктур InAlAs согласованных с подложкой InP методом МЛЭ для высокочувствительных фотодиодов

Д.В. Дмитриев, А.М. Гишинский, А.И. Торопов, К.С. Журавлёв  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Лаврентьева, 13,  
Новосибирск, 630090, Россия  
тел: (383)330-69-45, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [ddmitriev@isp.nsc.ru](mailto:ddmitriev@isp.nsc.ru)

В работе представлена технология предэпитаксиальной подготовки подложки и синтеза гетероструктур на основе InAlAs, согласованных с подложкой (001)InP, методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Оптимальные структурные характеристики слоёв InAlAs получены при температуре роста 520°C и соотношении потоков As и компонентов третьей группы порядка 10.

Для создания высокочувствительных и высокочастотных фотодетекторов, используемых в современных оптоволоконных линиях передачи данных было предложено использовать гетероструктуры InAlAs/InGaAs на подложке InP [1]. Для таких структур теоретически было предсказано уменьшение шума, увеличение отношения сигнал-шум и улучшение температурной стабильности. Однако, было показано, что в таких структурах наблюдаются высокие темновые токи [1-4]. Авторами ряда работ это связывается с межзонным туннелированием в InAlAs слое из-за наличия в запрещенной зоне материала уровней дефектов или примесей. Таким образом, для реализации предсказанных преимуществ структур InAlAs/InGaAs/InP необходима оптимизация технологии выращивания гетероструктуры и, в первую очередь, алюминий-содержащего слоя для получения низких концентраций центров, обуславливающих межзонное туннелирование носителей.

Экспериментальные структуры синтезировались методом МЛЭ в установках Riber-32P и Riber-21Compact. Исследована предэпитаксиальная подготовка поверхности подложки (001)InP. Отработаны режимы термической очистки поверхности в высоковакуумной камере. Синтезированы серии образцов  $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$  на подложке (001)InP, в которых варьировались ростовые параметры: температура подложки при иницировании роста и соотношения потоков растущих компонентов. Лучшие структурные характеристики слоёв по данным рентгеновской дифракции были получены при температуре 520 °C и соотношении потоков As и компонентов третьей группы не менее 10. Спектры низкотемпературной фотолюминесценции таких слоёв содержат единственную полосу, обусловленную межзонными переходами, в отличие от образцов, выращенных при более низких температурах, где наблюдались примесные пики.

### Литература

- [1] G. Karve, X. Zheng, X. Zhang, X. Li, S. Wang, F. Ma, A. Holmes, J. C. Campbell, G. S. Kinsey, J. C. Boisvert, T. D. Isshiki, R. Sudharsanan, D. S. Bethune, and W. P. Risk. IEEE J. Quantum Electron., vol.39, 1281 (2003).
- [2] K. Zhao, A. Zhang, Y. Lo, and W. Farr. Appl. Phys. Lett., vol.91, 081107 (2007).
- [3] K. Zhao, S. You, J. Cheng, and Y. Lo. Appl. Phys. Lett., vol.93, 153504 (2008).
- [4] Xiao Meng, Chee Hing Tan, Simon Dimler, John P R David, and Jo Shien Ng. Optics Express, vol.22, 22608 (2014).

## Электронная спектроскопия дисилицида железа

А.Ю. Игуменов<sup>1</sup>, А.С. Паршин<sup>1</sup>, Ю.Л. Михлин<sup>2</sup>,  
О.П. Пчеляков<sup>3</sup>, В.С. Жигалов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> СибГАУ им. М.Ф. Решетнева,

Красноярск, 660014, проспект газеты Красноярский рабочий, 31

<sup>2</sup> ИХХТ СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок, 50, стр. 24

<sup>3</sup> ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, просп. Академика Лаврентьева, 13

<sup>4</sup> ИФ им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок, 50, стр. 38

тел: (391) 291-92-57, факс: (391) 264-47-09, эл. почта: igumenovau@mail.ru

Полупроводниковый дисилицид железа является перспективным материалом для создания светоизлучательных фотодиодов и фотодетекторов [1]. Методы электронной спектроскопии получили широкое распространение в исследовании многокомпонентных композитных систем. В данной работе проведено комплексное исследование дисилицида железа методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), спектроскопии характеристических потерь энергии элеронов (СХПЭЭ) и спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов.

Спектры сечения неупругого рассеяния электронов (*Кл*-спектры [2]) отражают вероятность потери энергии электроном при однократном рассеянии. Наиболее интенсивными вкладами в *Кл*-спектры, как правило, являются потери энергии на возбуждение поверхностного и объемного плазмонов, интенсивности которых зависят от энергии первичных электронов, что проявляется в изменении формы спектра, положения и интенсивности максимума.

Для анализа *Кл*-спектров дисилицида железа применен предложенный нами ранее метод [3] аппроксимации *Кл*-спектров Лоренцево-подобными функциями Тоугаарда [4]. Данный метод использован для определения природы различных вкладов в электронный спектр (поверхностноподобные и объемноподобные возбуждения) и количественной их оценки, что является актуальной задачей электронной спектроскопии. Показано, что *Кл*-спектры более чувствительны к изменению вклада поверхностных возбуждений, чем спектры ХПЭЭ. Спектры сечения неупругого рассеяния электронов позволяют количественно исследовать тонкую структуру, несущую информацию о физической природе потерь энергии в железокремниевых структурах.

### Литература

[1] N. G. Galkin, D. L. Goroshko, E. A. Chusovitin, K. N. Galkin, S. A. Dotsenko, *Phys. Status Solidi*, **С 10**, 12 (2013).

[2] S. Tougaard, I. Chorkendorff, *Phys Rev. B*, **35**, (1987).

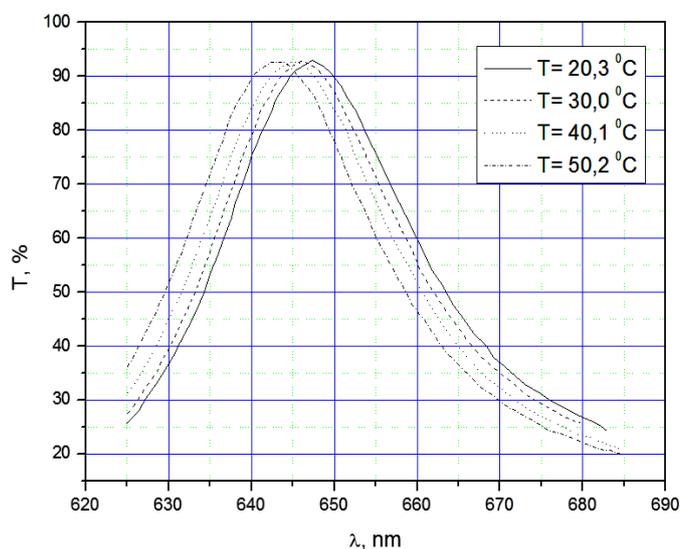
[3] А.С. Паршин, А.Ю. Игуменов, Ю.Л. Михлин, О.П. Пчеляков, А.И. Никифоров, В.А. Тимофеев, *ФТП* **49**, 4 (2015).

[4] S. Tougaard, *Surf. Interface Anal.* **25**, (1997).

## Термооптический преобразователь на базе микрорезонатора Фабри-Перо

В.А. Пилипович, В.Б. Залесский, **А.И. Конойко**, В.М. Кравченко  
Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Беларусь,  
г. Минск, 220072, пр-кт Независимости, 68,  
тел.: (37517)281-2956; факс (37517)281-3229, эл.почта: [kon54@yandex.by](mailto:kon54@yandex.by)

Известные достоинства неохлаждаемых тепловых многоэлементных приемников излучения микроболометров имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение. К числу последних относится наличие теплового шума Джонсона, избыточного токового  $1/f$ -шума, а также возникновение джоулева нагрева чувствительных элементов, проявляющегося в появлении тока смещения измерительной схемы [1]. Повышение геометрического и энергетического (температурного) разрешения инфракрасных систем, использующих неохлаждаемые приемники излучения, их пороговой чувствительности и приближение ее значения к величинам, характеризующим энергетическое разрешение фотонных фотоприемных устройств,



уменьшение их размеров, массы, потребляемой мощности, увеличение быстродействия и снижение их стоимости стимулирует интерес к системам визуализации ИК-изображений, в которых применяются оптические методы считывания вместо обычных для микроболометров схем считывания и накопления зарядов, возникающих в отдельных пикселах [2]. При изменении температуры микро-резонатора происходит изменение его оптической базы, которое является следствием температурного изменения, как толщины активного слоя, так и показателя преломления. Поэтому коэффициент температурного преобразования базы резонатора  $\alpha_p$  можно

определить из выражения  $\alpha_p = (\alpha_l + \alpha_n) = \frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}$ ; где  $\alpha_l$  – температурный коэффициент линейного расширения материала активного слоя;  $\alpha_n$  – температурный коэффициент изменения показателя преломления активного слоя;  $\Delta \lambda$  – температурный сдвиг максимума многолучевой интерференции по спектру;  $\Delta T$  – величина изменения температуры микрорезонатора;  $\lambda_0$  – длина волны соответствующая максимуму многолучевой интерференции при начальной температуре.

Подставляя в это выражение параметры, найденные из представленных на рисунке спектральных зависимостей, получим, что для рассматриваемого микрорезонатора величина коэффициента температурного преобразования базы резонатора  $\alpha_p = 2,583 \cdot 10^{-4} \text{ Град}^{-1}$ .

Подставляя в это выражение параметры, найденные из представленных на рисунке спектральных зависимостей, получим, что для рассматриваемого микрорезонатора величина коэффициента температурного преобразования базы резонатора  $\alpha_p = 2,583 \cdot 10^{-4} \text{ Град}^{-1}$ .

### Литература

- [1] Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы 3-го поколения. – М.: Логос, 2011. – 242 с.
- [2] В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. Современные проблемы инфракрасной техники. – М.: Изд. МИИГА и К, 2011. – 84 с.

# Зависимость критической толщины перехода по Странскому–Крастанову в системе $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ от температуры и состава

А.В. Войцеховский<sup>1</sup>, А.П. Коханенко<sup>1</sup>, К.А. Лозовой<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет, Томск, 634050, Ленина, 36  
тел: (382) 241-3517, факс: (382) 241-2772, эл. почта: lka@sibmail.com

Важное место в кинетике эпитаксиального роста полупроводников занимает переход по Странскому–Крастанову от двумерного к трехмерному росту в системах с рассогласованием по постоянной решетки между осаждаемым материалом и подложкой. Он заключается в том, что при определенной толщине осажденного депозита, называемой критической толщиной смачивающего слоя, вместо роста упругонапряженного слоя начинается быстрое зарождение трехмерных островков, когерентных с подложкой. Простейшие теоретические модели пытаются объяснить указанное явление на основе эффекта сегрегации [1, 2] или с помощью уравнения роста слоя в условиях поверхностной диффузии атомов под действием градиента химического потенциала атомов (теория морфологической неустойчивости) [3, 4]. Однако эти модели неспособны объяснить наблюдаемую температурную зависимость критической толщины и дают хорошее согласие с экспериментом только в области высоких температур роста.

В данной работе рассматривается рост слоев  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  на Si. Для расчета критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту по Странскому–Крастанову в этой системе используется теоретическая модель, основанная на общей теории нуклеации островков [5]. В этой модели учитываются не только упругая и поверхностная энергия атомов в островке, но и дополнительная энергия притяжения атомов к подложке. Изначально предложенная для системы Ge/Si модель уточняется путем учета зависимости от состава  $x$  модуля упругости, рассогласования решеток и удельной поверхностной энергии боковых граней.

Для определения критической толщины перехода предварительно рассчитывалась свободная энергия при переходе атомов из смачивающего слоя в островок, равновесная толщина смачивающего слоя, критическое число атомов в островке, активационный барьер нуклеации и скорость зарождения островков. Для нахождения критической толщины решалось уравнение для критического перенапряжения смачивающего слоя [5]. В результате построены зависимости критической толщины перехода по Странскому–Крастанову от состава  $x$  и от температуры. Показано, что полученные выражения позволяют объяснить экспериментально наблюдаемые температурные зависимости [6, 7] критической толщины при низком содержании германия.

## Литература

- [1] Y. Tu, J. Tersoff, Phys. Rev. Lett. **93**, 216101 (2004).
- [2] D.V. Yurasov, Yu.N. Drozdov, Semiconductors **42**, 563 (2008).
- [3] J. Stangl, V. Holy, G. Bauer, Rev. Mod. Phys. **76**, 726 (2004).
- [4] H.T. Johnson, V. Nguyen, A.F. Bower, J. Appl. Phys. **92**, 4653 (2002).
- [5] V. G. Dubrovskii, G. E. Cirlin, V. M. Ustinov, Phys. Rev. B **68**, 075409 (2003).
- [6] K. Brunner, Rep. Prog. Phys. **65**, 27 (2002).
- [7] A.I. Nikiforov, V.A. Timofeev, S.A. Teys, A.K. Gutakovsky, O.P. Pchelyakov, Nanoscale Research Letters **7**, 561 (2012).

## Локализованные поверхностные плазмоны в массивах наномантенн Au

И.А. Милёхин<sup>1</sup>, Е.Е. Родякина<sup>1,2</sup>, А.В. Латышев<sup>1,2</sup>, С.А. Кузнецов<sup>2</sup>,  
Л.Л. Свешникова<sup>1</sup>, А.Г. Милёхин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> НГУ, Новосибирск, 630090, Пирогова, 2

тел: (383) 316-6054, факс: (383) 333-2771, эл. почта: [mia2994@gmail.com](mailto:mia2994@gmail.com)

Наномантенны рассматриваются как перспективные наноструктуры для детектирования малых количеств биологических веществ, при создании тонкоплёночных солнечных элементов, для использования в качестве зондов в ближнепольной микроскопии. Металлические антенны проявляют эффект локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР), который отвечает за усиление отклика вещества, находящегося в непосредственной близости от наномантенны. Энергия ЛППР зависит от структурных параметров антенн (длина, ширина, высота антенны, расстояние между антеннами), диэлектрической проницаемости окружающей среды и подложки. Информация об этой энергии принципиально важна, поскольку она определяет рабочий спектральный диапазон наномантенн.

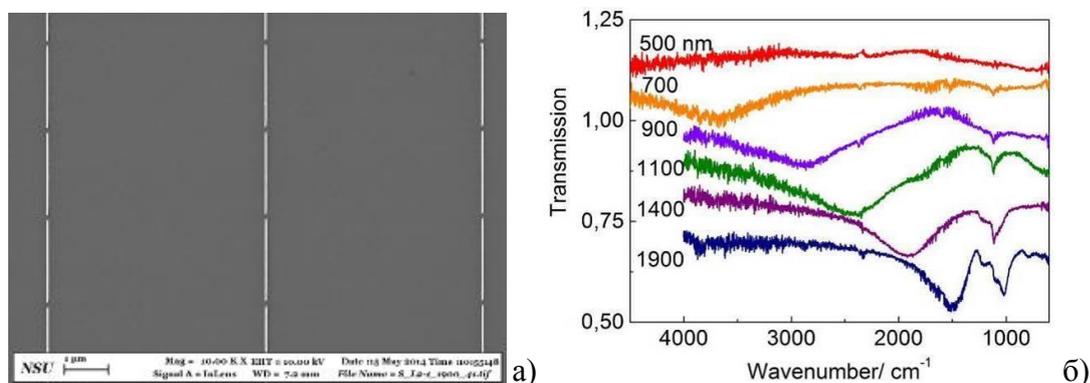


Рис.1 а)- СЭМ изображение массива наномантенн. б)- ИК-спектры пропускания массивов наномантенн разной длины на слое SiO<sub>2</sub> толщиной 58 нм.

В настоящей работе была исследована энергия ЛППР в массивах золотых наномантенн в зависимости от их длины. Наномантенны длиной 500-1900 нм, шириной 100 нм и высотой 50 нм были изготовлены с помощью фокусированного электронного пучка на подложке Si [100] со слоем SiO<sub>2</sub> различной толщины. Расстояние между торцами наномантенн составляло величину 200 нм, период – 5 мкм, размер массива наномантенн - 100x100 мкм<sup>2</sup>. Структурные параметры массивов наномантенн были получены с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Типичное СЭМ изображение массива наномантенн представлено на Рис.1а.

ИК спектры пропускания массивов наномантенн были записаны с помощью ИК фурье-спектрометра Bruker IFS-113v, снабженного ИК микроскопом. На Рис.1б показаны ИК спектры пропускания массивов с различной длиной антенн, сформированных на поверхности SiO<sub>2</sub> толщиной 58 нм. Положение минимума спектров пропускания соответствует энергии ЛППР. Как видно из Рис.1б, частота ЛППР уменьшается от 3500 до 1500 см<sup>-1</sup> при увеличении длины наномантенны от 700 до 1900 нм. Показано, что энергия ЛППР постоянна в массиве наномантенн, сформированных на слое оксида толщиной 23-100 нм. При уменьшении толщины SiO<sub>2</sub> с 23 до 0.8 нм наблюдалось нелинейное уменьшение энергии ЛППР, что свидетельствует об изменении эффективной диэлектрической проницаемости подложки и позволяет оценить величину локализации ЛППР.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-12-01037).

## **Спектральный рефлектометрический комплекс для технологического контроля оптических материалов фотоники по параметру объёмного рассеяния**

**С.В. Рыхлицкий, Е.В. Спесивцев, С.А. Дулин**

Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, просп. ак. Лаврентьева, 13  
тел: 8(383) 330 87 16; e-mail: evs@isp.nsc.ru

В приборах и устройствах фотоники применяется широкий спектр оптических материалов для изготовления различных конструктивных элементов: окон, линз, призм, модуляторов и др. Большинству из них, будь то кристаллические, аморфные, искусственные или натуральные всегда присуще объёмное рассеяние проходящего излучения. Оно оказывает, как правило, негативное влияние на работоспособность оптической системы и на снижение ее предельных характеристик. Особенно актуален учет рассеянного излучения при построении изображающих камер и прецизионных измерительных устройств. Отечественная промышленность, на сегодняшний день, не выпускает аналитического оборудования для объективной оценки, сортировки и отбраковки оптических материалов по параметру объёмного рассеяния. В рамках решения данной задачи в ИФП СО РАН разработана методика и изготовлен опытный образец спектрального рефлектометрического комплекса КРС-2. Комплекс предназначен для проведения объективной оценки качества оптических материалов по параметру объёмного рассеяния, их сортировки и возможной отбраковки. В исследовательской практике возможно применение комплекса для измерения интенсивности светорассеяния в ряде прозрачных и мутных сред, таких как, кристаллы, стекло, жидкости, растворы, взвеси и др., с целью определения концентрации рассеивающих примесей, дефектов структуры, инородных включений и т.п.. Кроме того, разработанный комплекс, наряду с решением данных задач, позволяет определять диапазон прозрачности, наличие и спектр дихроизма, а также другие параметры, т.е., осуществлять комплексный технологический контроль качества используемых оптических материалов.

Комплекс построен по модульному принципу, на основе высокоинтенсивного Хе источника света и малогабаритного монохроматора МБМ-1М [1], полностью автоматизирован и управляется от ПК. Гибкое программное обеспечение, разработанное для ОС Windows 8, обеспечивает управление комплексом в различных режимах измерения, получение данных, вывод в численном и графическом виде измеренных спектров, их дальнейший анализ и обработку. Приводятся описание комплекса, его технические характеристики, результаты практического применения.

### ***Литература***

[1] С.В. Рыхлицкий, С.А. Дулин, и др., ПТЭ № 5, с. 162-163 (2006).

## Выращивание малодислокационных монокристаллов германия

О.И. Подкопаев<sup>1</sup>, Т.О. Павлюк<sup>1</sup>, А.Ф. Шиманский<sup>2</sup>, Н.О. Голубовская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Германий», Красноярск, 660027, Транспортный проезд, 1

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Свободный, 79  
тел: (391) 206-3715, факс: (391) 206-3715, эл. почта: shimanaf@mail.ru

Монокристаллы германия с минимальным содержанием дефектов и примесей имеют колоссальную перспективу в связи с развитием полупроводниковых нанотехнологий. Основным типом ростовых дефектов, оказывающих значительное влияние на свойства кристаллов, являются дислокации. В настоящее время активно обсуждаются подходы к получению кристаллов с совершенной структурой, в основе которых лежат следующие положения [1]: плоский или слабоогнутый фронт кристаллизации; однородное распределение температуры по высоте кристалла; низкий осевой температурный градиент в расплаве и кристалле, в отсутствие радиального градиента температуры; плоская форма изотерм и т.п. Наш опыт получения монокристаллического германия показывает, что в таком виде требования к процессу выращивания кристаллов имеют общий характер и не дают представления о его количественных параметрах [2].

Целью настоящей работы является расчетный и экспериментальный анализ теплового поля в ростовой системе, закономерностей формирования дислокационной структуры в монокристаллах германия в ходе их выращивания методом Чохральского.

Слитки германия выращивали методом Чохральского на установке типа РЕДМЕТ. Тепловой блок состоял из двух графитовых нагревателей – основного диаметром 340 мм и дополнительного диаметром 120 мм. Основной нагреватель обеспечивал донно-боковой нагрев тигля с расплавом. Назначение дополнительного нагревателя – подогрев боковой поверхности слитка. Данная конструкция теплового блока позволяет выращивать слитки германия диаметром 100 мм и длиной до 350 мм. В качестве исходного сырья использовали зонноочищенный германий ГПЗ. Химическая чистота ГПЗ, соответствующая марке 6N (99,9999 масс. %), определяет удельное электросопротивление материала более 47 Ом·см при комнатной температуре. Выращивание кристаллов производили в среде аргона, уровень расплава поддерживали постоянным путем перемещения нижнего штока. Направление роста было [100]. Тепловые расчеты осуществляли с применением программного комплекса CGSim (Crystal Growth Simulator).

Установлено, что максимальное значение радиального градиента температуры 1,0 град/см наблюдается в трехфазной области расплав – кристалл – газ. Осевой градиент температуры вблизи фронта кристаллизации максимален у краев слитка и достигает величины 12 град/см, в центральной части вблизи фронта кристаллизации его величина не превышает 10 град/см, и наблюдается линейное распределение температуры. При варьировании мощности дополнительного нагревателя от 0,35 до 0,75 кВт были выращены монокристаллы германия с плотностью дислокаций от 300 до 60 см<sup>-2</sup>.

### Литература

[1] Claeys Cor L. Germanium-based technologies: from materials to devices. Berlin [etc.]: Elsevier, 2007. 449 p.

[2] О.А. Подкопаев, А.Ф. Шиманский. Выращивание монокристаллов германия с низким содержанием дислокаций и примесей, Красноярск, 2013.

## Исследование оптическими методами слоёв КРТ, имплантированных ионами В<sup>+</sup>

В.А. Швец<sup>1,2</sup>, В.Г. Ремесник<sup>1</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>1</sup>, В.С. Варавин<sup>1</sup>,  
П.Л. Смирнов<sup>1</sup>, С.А. Дворецкий<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090,  
г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>3</sup> Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
тел: (383) 330-8716, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [shvets@isp.nsc.ru](mailto:shvets@isp.nsc.ru)

Ионная имплантация в материал КРТ широко применяется для создания фотодиодов как с архитектурой n-on-p так и с архитектурой p-on-n. Для оптимизации технологии создания этих структур необходим контроль параметров высоколегированных областей фотодиода. Такой контроль можно проводить с использованием оптических методов. Облучение ионами высоких энергий приводит к образованию кристаллических дефектов на всю глубину внедряемых ионов. Это в свою очередь изменяет оптические свойства КРТ в приповерхностной области. Поэтому для разработки методов контроля необходимо исследование оптических свойств таких слоёв.

Слои КРТ составов  $X_{\text{CdTe}}=0.42$  и  $0.22$ , выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии, облучались ионами бора с энергией в диапазоне от 50 до 190 кэВ. Доза облучения варьировалась от  $10^{13}$  до  $2 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. Спектры эллипсометрических параметров облучённых образцов измеряли на спектральном эллипсометре «Эллипс-1891» в диапазоне длин волн 250 – 1000 нм. Кроме того, в спектральном диапазоне от 1.5 до 12 мкм измеряли спектры пропускания и отражения при нормальном падении с помощью ИК Фурье спектрометра «ФТ – 801» (спектральный диапазон 500-7000 см<sup>-1</sup>, разрешение 1 см<sup>-1</sup>).

Из эллипсометрических измерений рассчитывали диэлектрические функции облучённого КРТ. Установлено, что уже при дозе  $10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> происходят значительные нарушения кристаллической структуры в приповерхностном слое материала толщиной ~1 нм. Последующее увеличение дозы приводит к разрушению характерной структуры в спектрах диэлектрических функций. Это проявляется в заметном уменьшении высоты пика  $\epsilon_2$  при энергии  $E_1$  и его уширении. Высота пика  $\epsilon_2(E_1+\Delta_1)$  при этом наоборот, возрастает с ростом дозы.

Были проведены исследования облучённых образцов при послойном травлении нарушенного слоя в Br-метанольном травителе. После каждого травления измерялись спектры отражения  $R(\nu)$  (где  $\nu$  - волновое число). Толщина стравленного слоя контролировалась по спектрам пропускания в области прозрачности КРТ. На спектрах отражения в области поглощения КРТ наблюдаются характерные осцилляции, связанные с интерференцией на нарушенном слое. Для интерпретации измеренных спектров  $R(\nu)$  были рассмотрены две модели отражающей структуры: (1) модель гауссова распределения показателя преломления нарушенного слоя по глубине слоя КРТ и (2) модель однородного слоя. На основании этих моделей была определена глубина залегания и толщина оптически контрастного слоя, а также установлен ряд особенностей в оптических спектрах КРТ.

## Химический состав анодных окисных пленок InAs и электрофизические параметры МДП-структур на их основе

А.В. Артамонов<sup>1</sup>, В.П. Астахов<sup>1</sup>, И.Б. Варлашов<sup>2</sup>, В.В. Карпов<sup>1</sup>, П.В. Митасов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ОАО «Швабе-Фотосистемы», Москва, 117545, Днепропетровский пр. 4А, стр. 3А  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
 Москва, 111250, Красноказарменная 14  
 тел. (495) 315-73-68, эл. почта: [art-bass@mail.ru](mailto:art-bass@mail.ru)

Известно, что введение в окислительную среду фторидов позволяет существенно улучшить свойства границы раздела полупроводник группы A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> – диэлектрик [1,2].

Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и C-V – характеристик исследованы соответственно химический состав анодных окисных пленок (АОП) InAs(111)A различной толщины и электрофизические параметры созданных на их основе МДП-структур Al-AOP-InAs. В экспериментах использовались пластины, вырезанные из слитков InAs марки ИМЭб. Для формирования АОП выбран электролит на основе смеси этиленгликоля и концентрированного раствора аммиака в соотношении 5:1 с добавкой фторсодержащей компоненты [1,2] – 40% водного раствора NH<sub>4</sub>F, обеспечивающей концентрацию NH<sub>4</sub>F в электролите ~ 12 г/л [2]. Процесс анодирования проводили в гальваностатическом режиме при плотностях тока (*j*) 0,055 мА/см<sup>2</sup> и 0,5 мА/см<sup>2</sup> до конечных напряжений (*U<sub>к</sub>*) 15, 20 и 25 В.

В таблице представлены значения параметров анодного окисления, толщины (*d*), показателя преломления (*n*) и относительной диэлектрической проницаемости (*ε*) АОП, а также электрофизических параметров МДП-структуры (плотности эффективного заряда на границе InAs-AOP (*Q<sub>ss</sub><sup>eff</sup>*) и напряженности электрического поля пробоя (*E*)).

№ образца	<i>j</i> мА/см <sup>2</sup>	<i>U<sub>к</sub></i> , В	<i>d</i> , Å	<i>n</i>	<i>ε</i>	<i>Q<sub>ss</sub><sup>eff</sup></i> , см <sup>2</sup>	<i>E</i> , В/см
1	0,055	15	339	1,8	2,7	3,4·10 <sup>11</sup>	4,8·10 <sup>6</sup>
2		20	420	1,83	2,8	2,9·10 <sup>11</sup>	6,1·10 <sup>6</sup>
3		25	532	1,86	2,5	2,2·10 <sup>11</sup>	5,9·10 <sup>6</sup>
4	0,5	15	290	1,81	3,4	3,5·10 <sup>11</sup>	4,2·10 <sup>6</sup>
5		20	412	1,83	2,5	2,4·10 <sup>11</sup>	5,8·10 <sup>6</sup>
6		25	502	1,88	2,2	2,2·10 <sup>11</sup>	5,9·10 <sup>6</sup>

Для всех МДП-структур дифференциальным методом Термана были рассчитаны значения плотности поверхностных состояний, которые во всех случаях составили (5÷7)·10<sup>11</sup> эВ<sup>-1</sup>см<sup>-2</sup>.

Исследования химического состава показали, что сформированные АОП состоят из оксифторидов индия и мышьяка, а также оксида индия (III). При этом фтор локализован вблизи границы InAs-AOP. Увеличение плотности тока в 10 раз в указанных пределах при одном и том же значении *U<sub>к</sub>* приводит к увеличению концентрации фтора в ~ 3 раза. Увеличение толщины АОП при одном и том же значении *j* также способствует, но менее значительно увеличению концентрации фтора.

Сопоставление всех полученных данных свидетельствует о том, что повышение концентрации фторидов вблизи границы InAs-AOP за счет увеличения *j* практически не изменяет *Q<sub>ss</sub><sup>eff</sup>*, в то время как более слабое увеличение концентрации фторидов при увеличении толщины АОП (длительности процесса анодирования) приводит к уменьшению *Q<sub>ss</sub><sup>eff</sup>* в ~ 1,5 раза.

### Литература:

- [1]. В.Н. Давыдов, Е.А. Лоскутова, И.И. Фефелова. Влияние фтора на свойства систем оксид – полупроводниковое соединение A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>. Микроэлектроника **15**, вып. 5, С. 455-459, (1986).
- [2]. Н.А. Валишева, А.А. Гузев, А.П. Ковчавцев, Г.Л. Курышев, Т.А. Левцова, З.В. Панова. Электрофизические свойства МДП-структур InAs-SiO<sub>2</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с модифицированной границей раздела. Микроэлектроника **38**, № 2, С. 99-106, (2009).

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ БАРЬЕРОВ ШОТТКИ Pt-окисел-n-GaAs

**А.Х. Мухамметоразова**

Институт солнечной энергии Академии Наук Туркменистана,  
Ашхабад 744000, Сапармурат Туркменбаши шаёлы, 31;  
[aurum-au@mail.ru](mailto:aurum-au@mail.ru)

Барьеры Шоттки металл-полупроводник на основе арсенида галлия (GaAs) давно привлекают внимание исследователей, как перспективные структуры для создания фотоприемников коротковолнового излучения [1].

Настоящая работа посвящена изучению электрических свойств диодов Pt-окисел-n-GaAs, созданных с использованием химических нанотехнологий [2]. Объектом исследования служили наноструктуры Pt-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Fe)-n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs. Омический контакт к подложке n<sup>+</sup>-GaAs создавался химическим осаждением Ni+Au. Барьерный контакт (БК) к слою n-GaAs создавался осаждением Pt из раствора H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> при температуре не более 90°C [3].

Перед осаждением Pt поверхность активного слоя n-GaAs обрабатывалась этаноловым раствором бромида железа (FeBr<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O). Между n-GaAs и Pt имеется диэлектрический (оксидный) нанослой Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Fe) толщиной  $\delta=15\div 50\text{Å}$  ( $\beta=1,02-1,3$ ) с шириной запрещенной зоны  $E_{\text{гох}} \approx 4,9\text{eV}$ . Площадь БК у разных структур составила 0,04-0,3 см<sup>2</sup>.

Исследовались C-U и I-U характеристики созданных нанодиодных структур. Полученные новые научные результаты при T=300K показаны в таблице. Они отражают степень разработки технологии изготовления Pt-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Fe)-n-GaAs диодных структур.

№	Структуры	$N_d-N_a$ , см <sup>-3</sup>	$\beta$	$W_o$ , μm	$E_{mo}$ , V/cm	$q\Phi_{Bo}$ , eV (I-U)	$q\Phi_{Bo}$ , eV (C-U)
1	Au-n-GaAs(k)	$3,3 \cdot 10^{15}$	1,16	0,56	$2,4 \cdot 10^4$	0,86	0,87
2	Pt-n-GaAs	$2,4 \cdot 10^{15}$	1,24	0,69	$2,3 \cdot 10^4$	0,83	0,95
3	Pt-n-GaAs	$8,3 \cdot 10^{14}$	1,06	1,14	$1,36 \cdot 10^4$	0,89	0,94
4	Pt-n-GaAs	$2,5 \cdot 10^{15}$	1,04	0,66	$2,3 \cdot 10^4$	0,90	0,90

Впервые создан идеальный диод на основе Pt-окисел-n-GaAs ( $\beta=1,04\pm 0,02$ ) с использованием нанослоя Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Fe) толщиной 25-30Å, и показано, что при этом на разных частотах (10, 100, 1000 кГц) на C-U-характеристиках напряжение отсечки  $U_c = \text{const}$ . Это означает, что присутствие атомов ферромагнетика Fe на границе раздела структур способствует созданию атомарно чистой поверхности полупроводника (n-GaAs) и появлению в наноструктуре специфических свойств [2]. Это приводит к снижению плотности поверхностных состояний, что доказывает совпадение с величиной  $q\Phi_{Bo}$ , определенной при помощи двух методов.

### *Литература*

- [1] Д. Мелебаев, Г.Д. Мелебаева, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, 43(1), 34(2009)
- [2] Д. Мелебаев. НАНОТЕХНИКА, инженерный журнал, №2(38), 106 (2014).
- [3] Д. Мелебаев, А.Х. Мухамметоразова. Тр. VI МНПК «Современные информационные и электронные технологии» Украина, г.Одесса, 363(2005).

# Формирование однородных по размеру наноструктур методом электронно-лучевой литографии: методы коррекции эффектов близости

К.А. Конфедератова<sup>1,2</sup>, Е.Е. Родякина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск, 630090, проспект ак. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2  
тел: (383) 330-9082, факс: (383) 333-1080, эл. почта: [kseniya.konfederatova@gmail.com](mailto:kseniya.konfederatova@gmail.com)

В настоящее время упорядоченные наноструктуры с контролируемой пространственной плотностью и размерами занимают ведущее место в фундаментальных и прикладных исследованиях. Одним из наиболее точных способов создания таких наноструктур является метод травления через маску в резисте, сформированную с помощью электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ).

Механизм экспонирования, вследствие взаимодействия электронов с образцом, является сложнейшим процессом. При этом появляется такая проблема, как эффект близости (ЭБ), оказывающая негативное влияние на разрешающую способность ЭЛЛ.

Эффект близости в ЭЛЛ описывается функцией близости (ФБ) [1]:

$$f(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left[ \frac{1}{\alpha^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\beta^2}\right) \right]$$

Доза, поглощенная резистом, представляет собой свертку функции близости с дозой экспонирования. Распространенным решением ЭБ является модификация дозы экспонирования с учетом ЭБ. Для успешной коррекции необходимо определить параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\eta$  для конкретного образца.

В работе определялись параметры для коррекции ЭБ при формировании методом ЭЛЛ массивов однородных по размеру наноструктур на основе кремния и кремния на изоляторе (КНИ). На подложке (кремний, КНИ) методом ЭЛЛ создан наноразмерный рисунок в позитивном резисте (полиметилметакрилате и Со-полимере) из упорядоченных массивов однородных по размеру отверстий в широком диапазоне размеров и периодов.

Получены зависимости распределения размеров отверстий в резисте от параметров экспонирования: периода в массиве, дозы, размера поля рисования без перемещения стола. Проведено моделирование процессов при экспонировании электронным пучком методом Монте-Карло для подложек с разной толщиной Si и SiO<sub>2</sub> в программе CASINO.

Разработаны программы для определения параметров ФБ по профилю линий в резисте [2] и по контуру пересекающихся ортогональных прямых в резисте [3].

## Литература

[1] M.Parich, J. Appl. Phys., 50, 4371 (1979).

[2] Q. Dai, S.-Y. Lee, Microelectronic Engineering 88 (2011) 3054–3061

[3] D. Schefzyk, D.E.F. Biesinger, D.A. Wharam, Microelectronic Engineering 87 (2010) 1091–1094

## Влияние защитного покрытия CdTe на электрофизические параметры эпитаксиальных пленок $Cd_xHg_{1-x}Te$

**Н.Н. Михайлов**, В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, В.Г. Ремесник, Ю.Г. Сидоров  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
630090 г. Новосибирск-90, пр. Ак. Лаврентьева, 13, E-mail:  
тел: (383) 330 49 67, факс: (383) 330 49 67, эл. почта: [mikhailov@isp.nsc.ru](mailto:mikhailov@isp.nsc.ru)

При изготовлении приборных структур на основе фоточувствительного материала  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ) для пассивации поверхности используют широкозонные слои и/или слои CdTe, которые в методе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в ростовой камере одновременно с ростом слоев КРТ.

Выращивание гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) КРТ МЛЭ и слоев CdTe проводилось на СВВ установке “Обь-М” на подложках (013)GaAs с in situ эллипсометрическим контролем состава и толщины растущего слоя. Структуры с фоточувствительным слоем состава рабочего слоя  $X=0,20\div 0,23$  и толщиной 6-8 мкм имели широкозонные варизонные слои на гетерогранице с подложкой CdTe/ZnTe/GaAs и на поверхности толщиной 0,5-1,5 мкм.

Электрофизические параметры структур ГЭС КРТ МЛЭ без слоя CdTe при 80 К имели концентрация электронов, подвижность и время жизни неосновных носителей заряда  $(2\div 5)\times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , более  $8\times 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$  и 5-8 мкс, соответственно, после выдержки в потоке ртути в камере роста.

Время выдержки ГЭС КРТ МЛЭ перед ростом слоя CdTe влияет на электрофизические параметры структуры. Уменьшение времени выдержки приводит к уменьшению концентрации электронов и времени жизни.

Нанесение слоя CdTe после выращивания структур без остановки технологического процесса приводит к уменьшению в 5-8 раз концентрации электронов, а время жизни неосновных носителей заряда уменьшается более чем на порядок. Термический отжиг ГЭС КРТ МЛЭ в атмосфере ртути со слоем CdTe не приводит к конверсии электронного в дырочный тип проводимости.

После удаления слоя CdTe и термического отжига ГЭС КРТ МЛЭ в атмосфере ртути концентрация электронов и время жизни неосновных носителей заряда составляют  $(2-5)\times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и 4-10 мкс при 80 К, соответственно, что совпадает с параметрами ГЭС КРТ МЛЭ полученными после выдержки в потоке ртути в камере роста.

Таким образом показано, что слой CdTe создает барьер для диффузии ртути, как в объем, так и из объема пленки ГЭС КРТ МЛЭ.

## Структуры *n-i-n*, *p-i-p*, *n-i-p* на основе эпитаксиальных плёнок **PbSnTe:In: изготовление и свойства**

А.Н. Акимов<sup>1</sup>, Д.В. Ищенко, Н.С. Пашин, С.П. Супрун, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский  
<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13  
тел: (383) 330-8888, эл. почта: ischenkod@isp.nsc.ru

В твердом растворе свинец-олово-теллур, легированном индием (PbSnTe:In), при гелиевых температурах происходит так называемый переход «металл-диэлектрик» [1, 2] и транспорт носителей заряда осуществляется в соответствии с теорией токов, ограниченных пространственным зарядом [3]. При этом токовые контакты на основе различных металлов являются заведомо неомическими, обладают инжекционными свойствами и вносят разный вклад в распределение потенциала и в вольт-амперную характеристику (ВАХ) [4].

Целью настоящих исследований является разработка технологии получения структур *n-i-n*, *p-i-p*, *n-i-p* на основе эпитаксиальных пленок PbSnTe:In и изучение их электрофизических и фотоэлектрических свойств.

Разработаны методы очистки поверхности исходных нелегированных эпитаксиальных пленок PbSnTe, методы конверсии типа проводимости исходных пленок, методы прецизионного нанесения нанометровых слоев индия для создания локализованных областей с высоким удельным сопротивлением в процессе последующего отжига пленок в вакууме.

Исследовались структуры с одинаковым *i*-слоем PbSnTe:In и различными контактными слоями. При этом осуществлялась как односторонняя инжекция электронов (дырок), так и двухсторонняя инжекция носителей заряда обоих сортов. Из ВАХ определены энергетический спектр локализованных состояний в запрещенной зоне и особенности, связанные с энергетической диаграммой конкретной структуры.

Исследован фотоотклик таких структур, возникающий при воздействии на них излучения модели абсолютно черного тела (АЧТ) и определена интегральная ампер-ваттная чувствительность при изменении температуры АЧТ в диапазоне (10 – 100) К.

Проведено сравнение ВАХ и фотоэлектрических свойств структур с контактами на основе *n-p*-слоев и структур с металлическими контактами.

### **Литература**

- [1] Б.А. Акимов, Б.А. Брандт, С.А. Богословский, Л.И. Рябова, С.М. Чудинов, Письма ЖЭТФ, т. 29, в. 1, 11 (1979).
- [2] Б.М. Вул, И.Д. Воронова, Г.А. Калюжная, Т.С. Мамедов, Т.Ш.Рагимова, Письма ЖЭТФ, т. 29, в. 1, 21 (1979).
- [3] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах*. – М., Мир, 1973, 416 с.
- [4] Alexander E. Klimov, Vladimir N. Shumsky. *Physica B* 404, 5028 (2009).

## Моделирование теплофизических процессов в конвертере субтерагерцового излучения в инфракрасное

П.С. Загубисало<sup>1</sup>, А.Г. Паулиш<sup>1</sup>, С.А. Кузнецов<sup>2</sup>

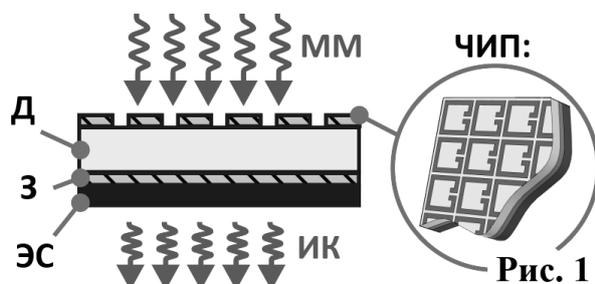
<sup>1</sup> Филиал ИФП СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева, 2/1  
<sup>2</sup> НГУ, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

тел: +7 (383) 330-97-49, внут. номер 365, эл. почта: [peter.zagubisalo@gmail.com](mailto:peter.zagubisalo@gmail.com)

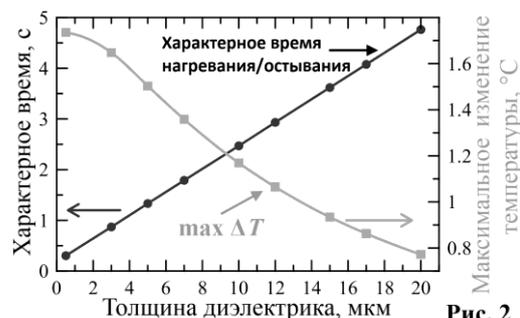
Проведено численное моделирование теплофизических процессов в ТГц-ИК конвертере, которые определяют основные характеристики теравизора на основе конвертера и болометрической камеры.

Структура ТГц-ИК конвертера (**Рис. 1**): **ЧИП** – частотно-избирательная поверхность, **Д** – диэлектрический слой, **З** – «земляной» слой (сплошная металлизация), **ЭС** – инфракрасный эмиссионный слой. **ЧИП**, **Д** и **З** образуют высокоимпедансную поверхность, работающую как ТГц-поглотитель с толщиной много меньше рабочей длины волны.

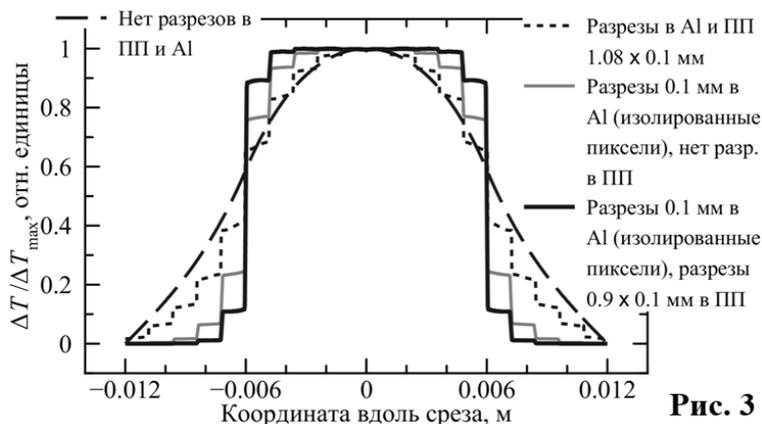
Эффективность конверсии ТГц-излучения в инфракрасное составила более 80%. Область линейности преобразования составляет около трёх порядков динамического диапазона по чувствительности. Значения минимальной обнаруживаемой плотности мощности 0.25



**Рис. 1**



**Рис. 2**



**Рис. 3**

Вт/м<sup>2</sup> соответствуют лучшим современным болометрическим детекторам. Получение изображения в режиме реального времени достигается при толщине диэлектрического слоя менее 3 мкм (**Рис. 2**). Эффект расплывания изображения может быть существенно уменьшен изготовлением соответствующих разрезов в структуре конвертера (**Рис. 3**). Al – алюминий. ПП – диэлектрик (полипропилен).

### Литература

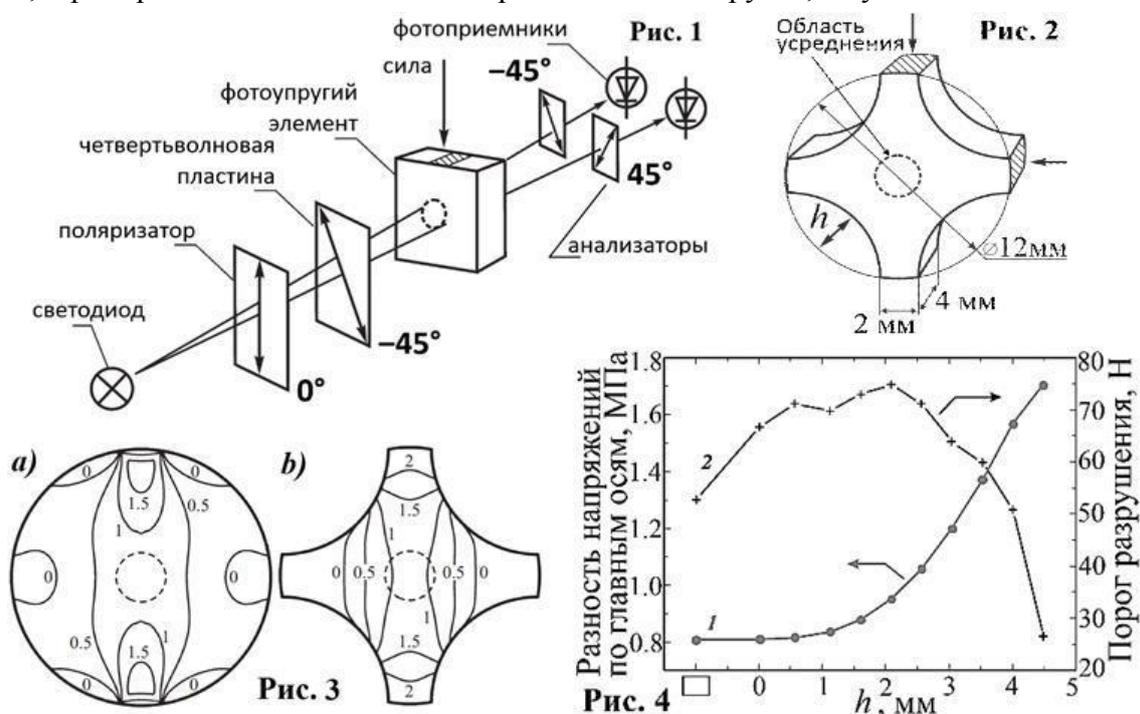
[1] П.С. Загубисало, А.Г. Паулиш, А.С. Кузнецов, А.В. Аржанников, М.К.А. Тумм. Моделирование теплофизических процессов в визуализаторе субтерагерцового излучения, основанном на тонкоплёночном конвертере из метаматериала. *Известия вузов. Радиофизика*. 2013, Том LVI, №1, стр. 22-38 (2013).

# Оптимизация свойств фотоупругого элемента для пьезооптических датчиков деформаций

А.Г. Паулиш<sup>1</sup>, П.С. Загубисало<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Филиал ИФП СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева, 2/1  
тел: +7 (383) 330-97-49, внут. номер 365, эл. почта: [peter.zagubisalo@gmail.com](mailto:peter.zagubisalo@gmail.com)

Изучены фотоупругие и механические свойства нового фотоупругого элемента для пьезооптических преобразователей, используемых для измерения деформаций (напряжений). Эффект фотоупругости (пьезооптический эффект) используется для прецизионного измерения напряжений или деформаций. Механические напряжения, прикладываемые к исходно изотропному материалу приводят к анизотропному изменению коэффициента преломления. Это, т.н., эффект двулучепреломления, который при падении на материал специально поляризованной световой волны приводит к разности фаз между компонентами поляризации поперек и вдоль оси напряжений. Преобразование разности фаз в выходной электрический сигнал, пропорциональный величине приложенной нагрузки, осуществляется с помощью



пьезооптического преобразователя (Рис. 1). Фотоупругий элемент (ФЭ) изготовлен из пластины плавленного кварца и имеет крестообразную форму (Рис. 2). Численное моделирование упругих напряжений, возникающих в объеме фотоупругого элемента при рабочих нагрузках, показало, что при одинаковом рабочем усилии крестообразная форма позволяет существенно повысить концентрацию напряжений в актуальной области фотоупругого элемента по сравнению с прямоугольной или круглой формой (Рис. 3). Численное моделирование прочностных характеристик данного фотоупругого элемента позволило определить оптимальный баланс между повышением эффективности фотоупругого элемента и изменением порога разрушения за счет изменения формы элемента (Рис. 4). Значком квадрата обозначен ФЭ квадратной формы. Глубина выреза  $h$  показана на Рис. 2.

## Литература

- [1] А.Г. Паулиш, П.С. Загубисало. Фотоупругий элемент для пьезооптических датчиков деформаций. *Письма в ЖТФ*, том 41, вып. 13 (2015).

## Полингованные нелинейно-оптические полимеры для генерации широкополосного терагерцового излучения

С. Л. Микерин<sup>1</sup>, А. И. Плеханов<sup>1</sup>, А. Э. Симанчук<sup>1</sup>, А. В. Якиманский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, 630090, проспект Академика Коптюга, д. 1

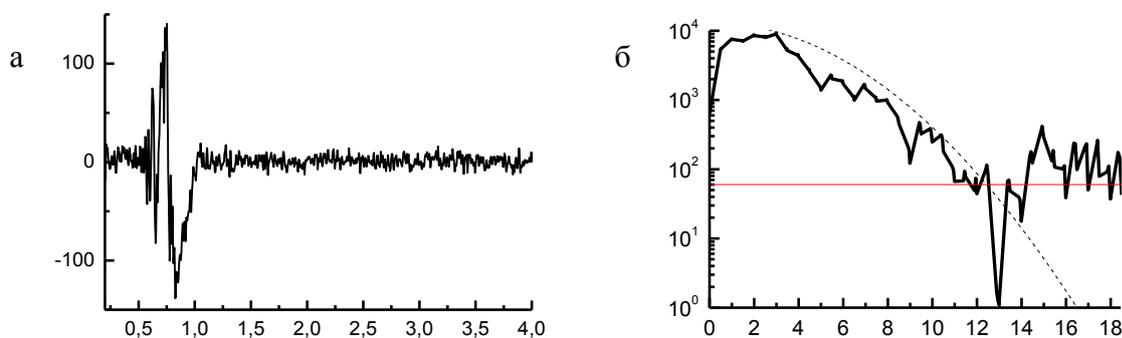
тел: (383) 330-6655, эл. почта: mikerinsl@iae.sbras.ru

<sup>2</sup> Институт высокомолекулярных соединений РАН,

Санкт-Петербург, 199004, В. О. Большой пр. 31

Применение органических сред (называемых в литературе электрооптическими полимерами [1, 2]) с приобретенными нелинейными оптическими свойствами для генерации и детектирования терагерцовых (ТГц) импульсов в когерентных (time-domain) спектрометрах [3] обещает дать уникальные возможности для спектроскопии ТГц диапазона. Электрооптические полимеры представляют собой композицию полимерной матрицы и молекул хромофора, ориентированных в процессе приготовления в одном направлении. Направленный синтез хромофоров с большим дипольным моментом, высокой гиперполяризуемостью первого порядка и согласования резонансной полосы с накачкой позволяют достигать на порядки более высокие значения нелинейных коэффициентов, по сравнению с кристаллическими материалами, и лучшего согласования ТГц и оптической волн, что дает преимущества в ширине и непрерывности спектрального рабочего диапазона.

Методами когерентной спектроскопии исследованы спектры пропускания и дисперсия показателя преломления в диапазоне частот 0,5-2,6 ТГц образцов полиимидных пленок на основе 1,3-бис-(3,4-дикарбоксифеноксид)бензен диангирида и 3,3'-дигидрокси-4,4'-диаминодифенилметана с ковалентным присоединением молекул хромофора DR-13. Путем оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в ориентированной (полингованной) полиимидной пленке толщиной менее 1 мкм получена генерация коротких (не-



сколько колебаний поля) терагерцовых импульсов (рис. а) с шириной спектра, ограниченно только длительностью импульса накачки (рис. б: горизонтальная линия показывает уровень шума, пунктир – спектр огибающей импульса накачки).

### Литература

[1] L.R. Dalton, P.A. Sullivan, D H. Bale, Chem. Rev. **110**, No.1, 25 (2010).

[2] A.V. Yakimansky, G I. Nosova, N.A. Solovskaya, et.al., Chem. Phys. Lett. **510**, 237 (2011).

[3] X.-C. Zhang, J. Xu, *Introduction to THz wave photonics*, Springer, 2010, Ch. 2.

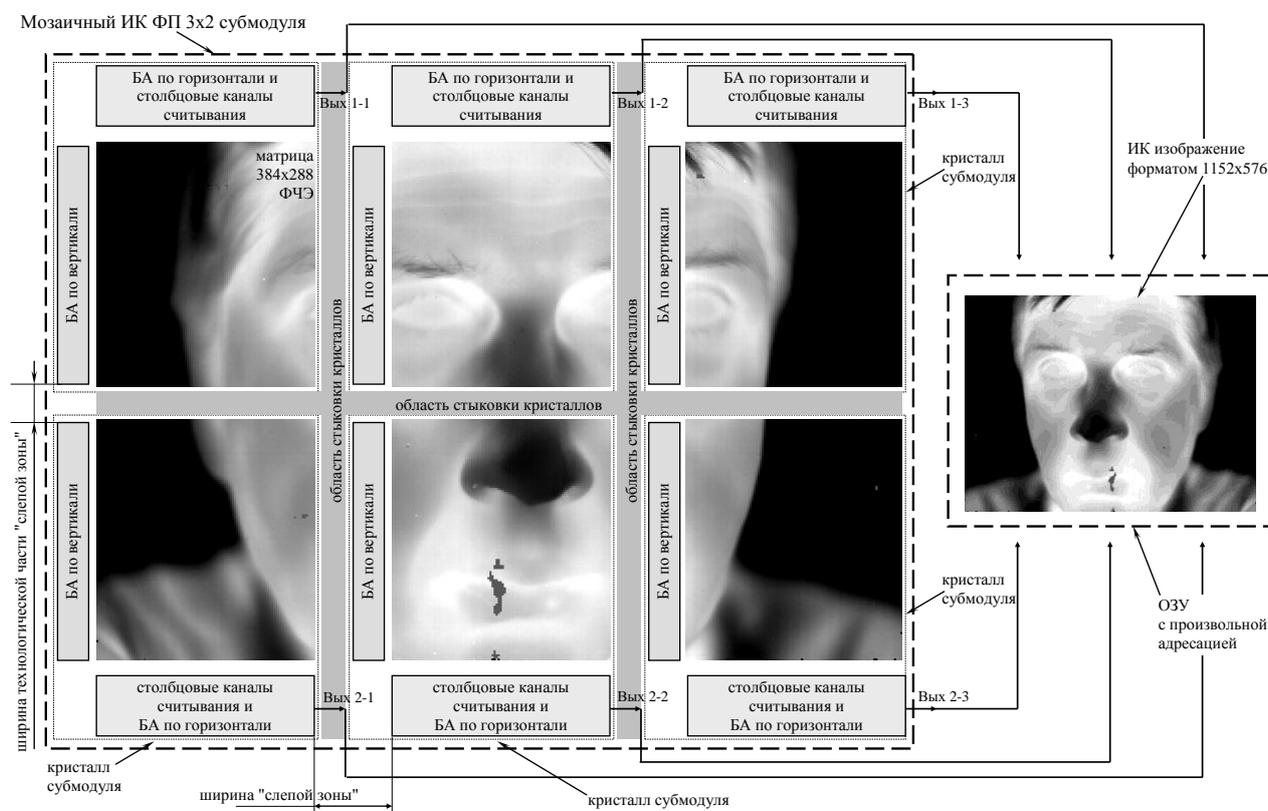
## Мозаичные инфракрасные и терагерцовые фотоприемники обзорно-панорамного формата: системный подход

М.А. Демьяненко<sup>1</sup>, Д.Г. Есаев<sup>1</sup>, А.И. Козлов<sup>1</sup>, А.Р. Новоселов<sup>2</sup>, В.Н. Овсяк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН), Новосибирск, 630090, пр-т Акад. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> Новосибирский филиал ИФП СО РАН “Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники” (КТИ ПМ), Новосибирск, 630090, пр-т Акад. Лаврентьева, 2/1  
тел: (383)333-19-54, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [kozlov@isp.nsc.ru](mailto:kozlov@isp.nsc.ru)

Одним из перспективных путей кардинального увеличения формата матричных микроболлометрических приемников изображений, как и других фотоприемников, является мозаичный принцип построения (рис.) [1].



Разработана прецизионная технология создания мозаичных фотоприемников (МФП) обзорно-панорамного формата [2]. Синтезированы конструкция МФП и схемы блоков субмодулей МФП [3]. Проработаны системные вопросы применения МФП.

При создании микроболлометрических МФП форматом 3072×576 на основе субмодулей размерностью 384×288 потеря фоточувствительных элементов (ФЧЭ) вдоль линии стыковки кристаллов для инфракрасных микроболлометров не превысит одного-двух элементов в зависимости от размера ячейки; для микроболлометров терагерцового диапазона можно обеспечить близкую стыковку кристаллов субмодулей в МФП без потери ФЧЭ вдоль линии стыковки [1, 3].

### Литература

- [1] М.А. Демьяненко, А.И. Козлов, В.Н. Овсяк и др. Оптический журнал, 3, 2014
- [2] А.Р. Новоселов. Пат. РФ № 2509391, 2014.
- [3] М.А. Демьяненко, А.И. Козлов, В.Н. Овсяк и др. Пат. РФ № 2530271, 2014.

# Комплексированный ИК+УФ интегральный матричный фотоприёмник на основе микроболлометров и SiC

А.А. Алтухов<sup>1</sup>, Ю.В. Гуляев<sup>2</sup>, Н.Х. Талипов<sup>2</sup>, В.С. Фещенко<sup>1</sup>,  
В.А. Шепелев<sup>1</sup>, Г.В. Чучева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО ПТЦ “УралАлмазИнвест”, Москва, 121108, ул. Ивана Франко, 4

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,  
Фрязино Московской обл. 141190, пл. ак. Введенского, 1  
тел: (926)246-5396, эл. почта: [nivazt@yandex.ru](mailto:nivazt@yandex.ru)

В настоящее время все большую актуальность приобретает разработка многоспектральных приемников оптического излучения, в которых фотоприемная структура, как правило, выполненная в виде широкоформатного матричного приемника излучения, обеспечивает чувствительность в двух (или более) спектральных диапазонах в зависимости от конкретной задачи. Расширение области чувствительности многоспектральных комплексированных ИК-матричных фотоприемников вплоть до ультрафиолетового диапазона спектра, очевидно, окажется более полезным как для обнаружения и идентификации объектов, так и помехозащищенности оптико-электронной системы на их основе.

В работе рассматривается возможность создания комплексированных планарных матричных фотоприемников ИК+УФ диапазонов спектра на основе карбида кремния и микроболлометров, интегрированных с кремниевой схемой считывания.

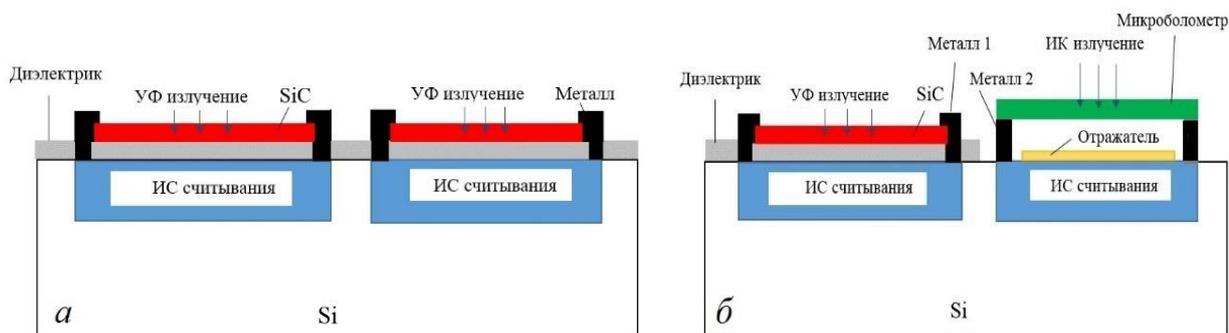


Рис. 1. Схема элементов матрицы SiC (а) фоторезисторов и матричного комплексированного приемника на основе микроболлометров и SiC (б) на кремниевой подложке со сформированными интегральными схемами считывания.

Для формирования фоточувствительных элементов на кремниевой пластине с изготовленными схемами считывания предлагается использовать низкотемпературную технологию осаждения слоев SiC на Si методом вакуумной лазерной абляции [1]. Фоточувствительные планарные SiC элементы матрицы (рис. 1, а) изготавливаются в виде фоторезисторов, лежащих на диэлектрике, нанесенного на кремниевую пластину и присоединяются напыленными металлическими электродами к интегральной схеме считывания через окна в диэлектрике. Данная технология может быть реализована и для создания комплексированного ИК+УФ матричного фотоприемника на основе микроболлометров [2] и SiC, в котором фоточувствительные элементы микроболлометров и SiC фоторезисторов в матрице располагаются в шахматном порядке (рис. 1, б). Предложенная технология позволит освоить производство комплексированных матричных ИК+УФ фотоприемников непосредственно на кремниевых фабриках.

## Литература

[1] А.С. Гусев, С.М. Рындя, Н.И. Каргин и др. Поверхность, № 5, 18 (2010).

[2] М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, В.Н. Овсянко и др. Оптический журнал, 76, 5 (2009).

## Высококчувствительный планарный матричный фотоприемник на основе алмаза для УФ-канала комплексированной инфракрасной оптико-электронной системы

А.А. Алтухов<sup>1</sup>, Ю.В. Гуляев<sup>2</sup>, Н.Х. Галипов<sup>2</sup>, Г.В. Чучева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО ПТЦ “УралАлмазИнвест”, Москва, 121108, ул. Ивана Франко, 4

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл. 141190, пл. ак. Введенского, 1  
тел: (926)246-5396, эл. почта: [niyazt@yandex.ru](mailto:niyazt@yandex.ru)

Потенциальные преимущества алмазных фотоприемников УФ-диапазона определяются тем что его фундаментальное поглощение ( $\lambda_c = 215$  нм) лежит в “солнечно-слепой” области. В сочетании с ИК-фотоприемниками, УФ-фотоприемники, как правило, изготовленные на основе кремния, встраиваются в многоспектральные комплексированные оптико-электронные системы (ОЭС) наблюдения и распознавания. В работе рассматривается возможность создания высококчувствительного планарного матричного УФ-фотоприемника на алмазе с пороговой чувствительностью  $\sim 10^{-16}$ – $10^{-15}$  Вт·Гц<sup>-1/2</sup> для встраивания в комплексированные ОЭС.

Серьезной проблемой технологии приборных структур на алмазе остается формирование высокопроводящих слоев. Вследствие высокой энергии активации атомов бора ( $E_a = 0,37$ эВ) при их малых концентрациях, в легированном бором в процессе роста CVD алмазе наблюдается очень низкая проводимость  $p$ -слоя при комнатной температуре. Имплантация ионов В<sup>+</sup> в нелегированный алмаз позволяет получать любые концентрации атомов бора. С ростом концентрации бора, энергия активации существенно уменьшается вплоть до  $E_a = 0,07$ эВ при  $T = 250$ – $413$  К. Подбирая дозу и энергию ионов бора в интервале  $E = 25$ – $500$  кэВ, в кристалле алмаза можно создавать как захороненные сильно компенсированные низкопроводящие тонкие  $p^-$ -слои, так и высокопроводящие  $p^+$ -слои в объеме и на поверхности. В результате формируется захороненный планарный фоторезистор, засветка которого УФ-излучением осуществляется со стороны верхнего  $p^+$ -слоя.

Реализуемость такой технологии обусловлена тем, что нелегированный алмаз обладает огромным удельным сопротивлением  $\rho$ , как правило,  $\rho = 10^{12}$ – $10^{13}$  Ом·см, поэтому не требуется дополнительных мер для изоляции отдельных ионно-имплантированных фоторезисторов в матрице друг от друга, они в данном случае являются как бы проводящими “мостиками” (их сопротивление на много порядков ниже сопротивления нелегированного алмаза), захороненными в изолирующей подложке. В этом случае взаимосвязью между элементами матрицы можно пренебречь. Особенностью данной матрицы УФ-фоторезисторов на алмазе является то, что захороненный компенсированный активный слой глубиной 0,5–1 мкм является высокоомным и располагается в области генерации носителей. Одновременно он удален от поверхности, тем самым подавляется поверхностная рекомбинация. Области под контакты как на поверхности, так и захороненные в объеме, являются сильнолегированными ( $p^+$ ). Для того, чтобы реализовать засветку с рабочей стороны, матричный алмазный УФ-фотоприемник с двухуровневой металлической разводкой и Si-мультиплексор располагаются в одной плоскости на подложке носителя, как правило, на керамике или сапфире.

Из теоретического анализа следует, что планарные алмазные УФ-фоторезисторы при напряжении смещения 0,5–1 В имеют обнаружительную способность в 100–200 раз больше, чем обычные УФ-фоторезисторы, изготовленные на нелегированном алмазе толщиной  $\sim 300$  мкм, при напряжении смещения 200–250 В.

## Эллипсометрический комплекс терагерцового диапазона

И.А. Азаров<sup>1,3</sup>, В.А. Швец<sup>1,3</sup>, Б.А. Князев<sup>2,3</sup>, Ю.Ю. Чопорова<sup>2,3</sup>,  
С.В. Рыхлицкий<sup>1</sup>, В.Ю. Прокопьев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева 13

<sup>2</sup> ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева 11

<sup>3</sup> НГУ, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2.

тел: (383)330 89 46, факс: (383)333 27 71, эл. почта: [azarov\\_ivan@mail.ru](mailto:azarov_ivan@mail.ru)

Эллипсометрия оптического диапазона в настоящее время является широко используемым методом исследования поверхностей и оптических свойств различных материалов. Переход к субмиллиметровым длинам волн зондирующего излучения открывает новые перспективы применения эллипсометрических методик в различных областях, как науки, так и промышленности. Особый интерес терагерцовая эллипсометрия может представлять для бесконтактных методов измерения профилей концентрации носителей заряда. Спектроскопические измерения в терагерцовом диапазоне применяются, используя метод спектроскопии высокого временного разрешения (time-domain spectroscopy), либо методы Фурье-спектроскопии, но эти методы дают низкое соотношение сигнал-шум и необходимая для эллипсометрических измерений точность не достигается [1]. В настоящей работе эллипсометрические измерения проводились на базе классической фотометрической схемы с вращающимся анализатором, где в качестве источника излучения использован Новосибирский лазер на свободных электронах.

В основе прибора лежит бескомпенсаторная PSA схема эллипсометрических измерений. Излучение модулируется обтюратором с частотой 90 Гц, что позволяет реализовать схему синхронного детектирования. Часть излучения с помощью делительной пластины, изготовленной из полипропиленовой плёнки, отводилось в опорный канал для компенсации нестабильности по мощности излучения лазера. Решеточные поляризаторы на полиэтиленовой основе 1200 штрихов/мм вращались с помощью шаговых двигателей с точностью позиционирования 2 угловые минуты. Для регистрации терагерцового излучения использовалось серийное тепловое приёмное устройство МГ-33.

Были выполнены измерения эллипсометрических параметров монокристаллического кремния в зависимости от угла падения при длине волны 147 мкм. Хорошее согласие с теоретическими предсказаниями позволило применить терагерцовый эллипсометр для изучения более сложных объектов. Измерены толщины и показатель преломления образцов плёнок ZnS на золотой плёнке. Проверено сохранение поляризации волны при прохождении спирального дифракционного элемента. Измерено вращение плоскости поляризации массивом 3D наноспиралей. Разработана приставка полного внутреннего отражения для измерений сильно поглощающих жидкостей и порошков.

По результатам тестовых измерений показана высокая точность данного прибора, она составила порядка 0.3 градуса для параметра  $\psi$  и 0.03 для  $\cos(\Delta)$ .

### Литература

[1] T.Hofmann, C.M.Herzinger, J.L. Tedeco, D.K.Gaskill, J.A.Woolam, M.Shubert. Thin Solid Films **519** (2011) 2593-2600.

# Влияние пьезоэлектрического эффекта на характеристики линейной и нелинейной дифракции световых пучков в кристалле ниобата лития

А.С. Перин, В.Ю. Рябченко, В.М. Шандаров

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Томск, 634050, пр. Ленина, 40  
тел: (3822) 701-518, эл. почта: perin.anton@gmail.com

Распространение оптического излучения в нелинейно-оптических средах может сопровождаться эффектами трансформации спектральной и пространственной структуры световых полей [1]. В средах с кубичной нелинейностью значительный интерес представляют эффекты самовоздействия света, проявляющиеся в результате изменения диэлектрической проницаемости среды на частоте падающей световой волны [1, 2]. Для световых пучков это приводит к пространственному самовоздействию, под которым понимаются явления их самофокусировки, самодефокусировки и формирование пространственных оптических солитонов [2, 3]. Режим пространственных солитонов предполагает полную компенсацию дифракционного уширения светового пучка за счет оптической нелинейности материала. При исследовании эффектов пространственного самовоздействия световых полей наибольший интерес проявляется к фоторефрактивным материалам, в которых данные эффекты могут наблюдаться при интенсивностях света в  $\text{МВт/см}^2$  [2].

Целью данной работы явилось экспериментальное исследование формирования канальных оптических волноводных структур в номинально чистом фоторефрактивном кристалле  $\text{LiNbO}_3$  на длинах волн света 532 нм и 633 нм за счет вклада пьезоэлектрического эффекта в нелинейный отклик среды.

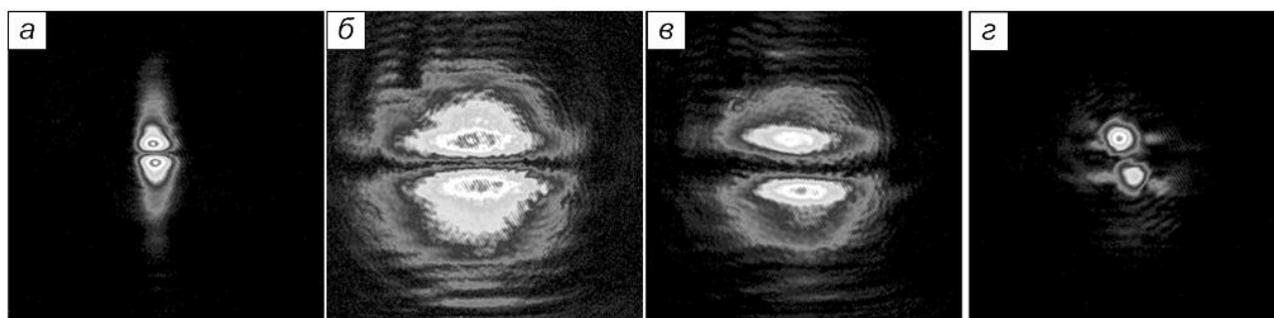


Рисунок 1 - Картины распределения световых полей (для  $\lambda=532$  нм) на входной (а) и выходной гранях кристалла в начальный момент времени в линейном (б) и нелинейном (в) режиме дифракции; (г) - картина светового поля на выходной плоскости образца в режиме светлых пространственных солитонов

В работе экспериментально продемонстрирована компенсация линейной и нелинейной дифракции узких лазерных пучков с длиной волны 532 нм (рис.1) и 633 нм, а также формирование фотонных волноводов и волноводных схем за счет вклада пьезоэлектрического эффекта в нелинейный отклик кристалла ниобата лития. Полная компенсация линейного и нелинейного дифракционного уширения световых пучков показана для нелегированного образца при его равномерном нагреве до температуры 3

## Литература

- [1] Akhmanov S.A., Sukhorukov A.P. and Khokhlov R.V. Self-focusing and diffraction of light in a nonlinear medium // Sov. Phys. Usp. 1968. № 10. P. 609-634.
- [2] Kivshar Y.S., Agrawal G.P. Optical solitons: from fibers to photonic crystals // Academic Press. 2003. 540 P.
- [3] Chen Z., Segev M. and Christodoulides D.N. Optical spatial solitons: historical overview and recent advances // Rep. Prog. Phys. 2012. V. 75. 086401.

## Определение объёмной и локальных длин диффузии носителей заряда в фоточувствительном слое матричных ИК-приёмников фотодиодного типа на основе материала кадмий-ртуть-теллур

А.В. Вишняков, В.А. Стучинский, Д.В. Брунёв, А.В. Зверев, С.А. Дворецкий  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 13  
тел: (383) 333-2276, факс: (383) 333-2276, эл. почта: [stuchin@isp.nsc.ru](mailto:stuchin@isp.nsc.ru)

Формирование фотосигналов в матричных инфракрасных фотоприёмных устройствах (ИК ФПУ) фотодиодного типа осуществляется посредством диффузии неосновных носителей заряда (НЗ) по плёнке фоточувствительного материала к диодам фотодиодной матрицы (ФМ). Поэтому знание длин диффузии НЗ в фоточувствительной плёнке (ФП) фотоприёмника чрезвычайно важно при проектировании ИК ФПУ и моделировании процессов в таких устройствах. В данной работе описана общая схема анализа данных, получаемых методом сканирования светового пятна выбранным диодом ФМ, для определения объёмной длины диффузии НЗ в фоточувствительном материале ФПУ, а также для определения локальной длины латеральной диффузии НЗ в области под фотодиодами устройства  $l_{d\text{ eff}}$ .

Предлагаемый подход базируется на проведении экспериментов по сканированию светового пятна диодом матрицы в условиях с разным уровнем фототоков диодов (определяемым величиной затворного потенциала входного транзистора фотоэлектрических ячеек ФПУ при измерениях пространственных распределений фотосигнала  $S(x)$ ). Действительно, в фоточувствительной плёнке ИК ФПУ на основе материала HgCdTe с подавленной (средствами варизонного дизайна) рекомбинацией избыточных НЗ на границах плёнки величины времени жизни НЗ и их длин диффузии определяются: (1) отбором фототока на диодной стороне ФМ и (2) объёмной рекомбинацией избыточных НЗ в фоточувствительном материале устройства. Поэтому объёмная длина НЗ в ФП ФПУ  $l_d$  может быть определена из данных сканирования, полученных при малом уровне фототоков диодов [1]. При величине  $l_d$ , превышающей как толщину ФП  $d$ , так и характерный размер структуры ФМ, анализ данных сводится к рассмотрению простой одномерной диффузионной задачи, и величина  $l_d$  может быть определена стандартным методом по наклону построенных в полулогарифмических координатах зависимостей  $S(x)$ .

При нормальном режиме работы ФПУ (со значительным уровнем отбора НЗ из ФП) оба указанных условия применимости простой модели диффузии НЗ с нулевой толщиной плёнки нарушаются. Тем не менее, оказывается, что анализ данных сканирования, направленный на определение длины  $l_{d\text{ eff}}$  в нормальном режиме работы ФПУ, может быть проведен в рамках упрощенной двумерной диффузионной модели с  $d=0$ , описание, а также анализ свойств и погрешностей которой даны в работе [2]. Численное решение двумерной диффузионной задачи с последующей подгонкой рассчитанного профиля фотосигнала к измеренному профилю  $S(x)$  позволяет определить величину фигурирующего в двумерной модели коэффициента отбора фототока диодами из ФП, а из него – величину длины  $l_{d\text{ eff}}$ .

### Литература

- [1] A.V. Vishnyakov, V.A. Stuchinsky, D.V. Brunev, A.V. Zverev, S.A. Dvoretzky, Appl. Phys. Lett. **104**, 092112 (2014).
- [2] А.В. Вишняков, В.А. Стучинский, Д.В. Брунев, А.В. Зверев, С.А. Дворецкий, Прикладная физика, **1**, 44 (2015).

## Переключение поляризационных мод излучения лазерных диодов на основе n-AlGaAs/GaAsP/p-AlGaAs при внешних напряжениях

Е.В. Богданов, Е.П. Кубашевский, Н.Я. Минина

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр.2,  
Москва, 119991, Россия

тел: (495)939-3941, факс: (495)939-1360, эл. почта: [bev@mig.phys.msu.ru](mailto:bev@mig.phys.msu.ru)

В настоящей работе представлены результаты численных расчетов эффекта влияния на излучение лазерных диодов анизотропных деформаций, которые могут возникнуть в результате внешних механических или температурных воздействий, а также данные экспериментальных исследований поляризации излучения структур с квантовой ямой из GaAs<sub>0.84</sub>P<sub>0.16</sub> шириной 14 нм при одноосном сжатии до 5 кбар вдоль направления [110].

Уравнение Шредингера с гамильтонианом в представлении Латтинжера-Кона с учетом деформационных членов решалось самосогласованно с уравнением Пуассона для электростатического потенциала конечно-разностным методом [1]. В результате численных расчетов спектры размерного квантования, волновые функции и коэффициенты оптического усиления ТМ и ТЕ поляризационных мод  $g_{TM}$  и  $g_{TE}$  определены для выращенных в направлении [001] гетероструктур p-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub>/n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с содержанием фосфора от  $y = 0$  до  $y = 0.20$  и шириной квантовой ямы от 4 до 20 нм при одноосном сжатии вдоль кристаллографических направлений [110], [100] и [001] в интервале давлений до 10 кбар.

При сжатии в плоскости структуры вдоль направлений [110] и [100] отмечается сильная деформационная зависимость соотношения коэффициентов оптического усиления ТМ и ТЕ мод, в результате чего под давлением возможно переключение излучения с доминирующей ТМ поляризацией к излучению с доминирующей ТЕ поляризацией. Это является следствием сильного изменения энергетического спектра и симметрии уровней в квантовой яме, что приводит к перемешиванию состояний легких и тяжелых дырок и изменяет правила отбора.

В случае сжатия вдоль [001] как исследованные структуры, так и волновые функции симметрию не меняют, соответственно, перемешивания состояний легких и тяжелых дырок в  $\Gamma$ -точке не происходит, а изменение соотношения  $g_{TM}$  и  $g_{TE}$  обусловлено в этом случае относительным смещением уровней размерного квантования легких и тяжелых дырок. При этом в случае пересечения основных состояний легких и тяжелых дырок также может наблюдаться переключение излучения, но с доминирующей ТЕ поляризации к излучению с доминирующей ТМ поляризацией.

Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальной работой [2], в которой при сжатии структур с квантовой ямой из GaAs<sub>0.84</sub>P<sub>0.16</sub> шириной 14 нм вдоль направления [110] до 5 кбар наблюдается смещение пиков электролюминесценции в голубую область спектра и 2-х-3-х кратный рост их интенсивности, а также подтверждаются полученными экспериментальными данными об изменении поляризации излучения этих структур при одноосном сжатии, согласно которым анизотропия интенсивности излучения  $I_{TM}/I_{TE}$  падает приблизительно в 1,5 раза со значения 1,8 в отсутствие нагрузки до примерно 1,2 при  $P = 5,1$  кбар.

### Литература

- [1] K.I.Kolokolov, A.M.Savin, S.D.Beneslavski et al., Phys. Rev. B **59**, 7537 (1999).
- [2] I.V.Berman, E.V.Bogdanov, H.Kissel et al, Phys. Stat. Sol. (b) **246**, 522 (2009).

## Генерация акустических волн двумерным экситонным газом

**М.В. Боев**<sup>1</sup>, В.М. Ковалев<sup>1,2</sup>, А.В. Чаплик<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт Физики Полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> НГТУ, Новосибирск, 630073, пр-т К.Маркса, 20

<sup>3</sup> НГУ, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, д. 2.

*тел: (383) 333-3264, факс: (383) 333-2771, эл. почта: boevm@isp.nsc.ru*

В докладе представлена теория генерации акустических волн газом непрямых дипольных экситонов в двойной квантовой яме, расположенной на поверхности полупроводниковой подложки, под действием внешнего возмущения. Предполагается, что такая генерация возможна по следующему механизму: внешнее воздействие вызывает возмущение плотности двумерного экситонного газа, который, в свою очередь, воздействуя на кристаллическую решетку, вызывает звуковые колебания в материале.

Рассматриваются два типа внешнего воздействия: облучение экситонного газа электромагнитной волной или потоком заряженных частиц. В первом случае электромагнитное поле модулируется дифракционной решеткой, расположенной над 2D экситонным газом. Модулированное электромагнитное поле интенсивно взаимодействует с дипольными моментами экситонов. Во втором случае внешним воздействием является поле движущихся зарядов.

Нами получены аналитические выражения для амплитуды генерируемого звука и для количества излучаемой в единицу времени звуковой энергии для двух случаев: температура системы выше критической температуры конденсации экситонов и при близких к нулю температурах, когда наиболее ярко проявляются эффекты экситонного бозе-конденсата.

Интенсивность генерируемых акустических волн определяется структурой функции отклика экситонного газа на внешнее воздействие, которая существенно различается в условиях нормальной фазы экситонной подсистемы и при наличии конденсата. Таким образом, показано, что частотная и концентрационная зависимости интенсивности генерируемого звука имеют различное поведение при фазовом переходе экситонного газа в режим БЭК. Это позволяет в эксперименте наблюдать переход нормальная фаза - конденсат в экситонном газе посредством измерения интенсивности генерируемых экситонами звуковых волн.

## Рекомбинация носителей заряда в структурах $\text{Cd}_{0,3}\text{Hg}_{0,7}\text{Te}/\text{Si}(013)$

В.С. Варавин, Д.В. Марин, М.В. Якушев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова,  
Новосибирск, 630090, Лаврентьева, 13

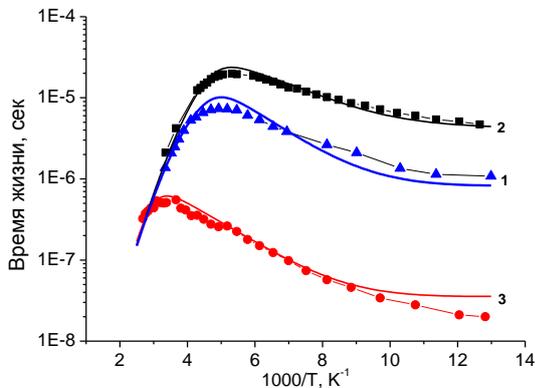
тел: (383) 330-99-23, факс: (383) 330-49-67, эл. почта: varavin@isp.nsc.ru

Процессы генерации-рекомбинации оказывают определяющее влияние на вольтамперные характеристики ИК фотодиодов. Снижение плотности генерационно-рекомбинационных токов, величина которых зависит от свойств глубоких генерационно-рекомбинационных уровней дает возможность поднять рабочую температуру фотодиодов.

В работе исследованы температурные зависимости времени жизни неосновных носителей заряда в эпитаксиальных нелегированных и легированных In в процессе роста структурах  $\text{Cd}_{0,3}\text{Hg}_{0,7}\text{Te}$ , выращенных методом МЛЭ на подложках Si(013), в диапазоне температур 77-300К. Рассмотрено влияние термообработок при различном давлении паров ртути на время жизни. Расчеты времени жизни проводились с учетом излучательной, Оже- и Шокли-Рида рекомбинации в соответствии с работой [1].

Экспериментальные температурные зависимости времени жизни неосновных носителей заряда в образцах после роста объясняются наличием глубоких уровней с различным энергетическим положением (0,05 и 0,12эВ) в разных образцах. Глубокие уровни, предположительно, могут быть связаны с дефектами роста кристаллической структуры КРТ/Si.

Выявлена корреляция между плотностью ямок травления (EPD) и величиной времени жизни при 77К по площади структур.



Активационный отжиг и отжиг на заполнение вакансий при насыщенном давлении паров ртути приводят к увеличению времени жизни в диапазоне температур 77-200К в несколько раз (кривая 2 рис.1), по сравнению со значениями после роста (кривая 1 рис.1). Для подавления рекомбинационных центров, связанных с ростовыми дефектами в пленках МЛЭ КРТ/Si, достаточно отжига при температуре около 220<sup>0</sup>С, при котором резко уменьшается плотность дефектов упаковки.

Отжиг при низком давлении паров ртути дает вакансионный материал p-типа, в котором время жизни при температуре 77К составляет несколько десятков наносекунд (кривая 3 рис.1) и определяется рекомбинацией Шокли-Рида на ловушках с энергией  $E_t \approx 0,05-0,06$  эВ, что согласуется с литературными данными для материала КРТ, выращенного другими методами.

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ RFMEFI60414X0134.

### Литература

[1] Lopes V.C., Syllaios A.J., Chen M.C. *Semicond. Sci.Technol.*, **8**, 824, (1993).

## Возрастание диффузионной длины неосновных носителей заряда в твердых растворах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ( $x=0\dots 0,1$ ), выращенных методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии

Т.В. Малин<sup>1</sup>, А.М. Гилинский<sup>1</sup>, В.Г. Мансуров<sup>1</sup>, Д.Ю. Протасов<sup>1</sup>,  
А.В. Кожухов<sup>1</sup>, Е.Б. Якимов<sup>2</sup>, О.В. Кибис<sup>3</sup>, К.С. Журавлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИФП СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия.

<sup>2</sup> ИПТМ РАН, ул. Академика Осипьяна, 6, Черноголовка, 142432, Россия.

<sup>3</sup> НГТУ, пр. К.Маркса, 20, Новосибирск, 630073, Россия.

тел: (383) 330-69-45, факс: (383) 333-27-71, эл. почта: [gilinsky@isp.nsc.ru](mailto:gilinsky@isp.nsc.ru)

Конструкция и характеристики полупроводниковых приборных структур с  $p$ - $n$ -переходом, работа которых основана на фотогенерации или инжекции неосновных носителей заряда (н.н.з.), существенно зависят от длины диффузии н.н.з.  $L_d$ . Значения длины диффузии, приводимые в литературе для практически важных материалов группы  $\text{A}_3$ -нитридов, в слоях с номинально близкими параметрами варьируются от десятков нанометров до единиц микрон, что обусловлено, очевидно, различиями в спектре и концентрации дефектов в слоях, полученных в различных условиях. Для оптимизации приборных гетероструктур необходимо, таким образом, определение величины  $L_d$  в используемых материалах.

В данной работе обсуждаются результаты изучения длины диффузии дырок в слоях  $n$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с составами  $x=0\dots 0,1$  и уровнем легирования  $n=(2-5)\times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , предназначенных для фотоприемных структур ультрафиолетового диапазона спектра. Исследуемые образцы выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии в установке Riber CBE-32P с использованием аммиачного источника активного азота. Рост производился на подложках сапфира при температуре  $870^\circ\text{C}$ . Измерение длины диффузии н.н.з. производилось двумя методами. Для измерения величины  $L_d$  в приборной гетероструктуре с  $p$ - $n$ -переходом применялась методика регистрации спектральной зависимости фототока диода в режиме «на просвет», использующая зависимость глубины генерации пар носителей от длины волны возбуждающего излучения. Для определения  $L_d$  в «толстых» (до 2 мкм) слоях, синтезируемых при отработке технологии роста структуры и её легирования, использовалась методика тока, наведенного электронным пучком. Измерение этим методом проводилось при освещении формируемым в электронном микроскопе пучком электронов с переменной энергией структуры с барьером Шоттки, созданным на поверхности исследуемого слоя. Измерения проводились при комнатной температуре.

Значения длины диффузии дырок в слоях твердых растворов  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ , измеренные с помощью обоих методов, составили 120–150 нм. Увеличения  $L_d$  в «толстых» слоях не наблюдалось. Напротив, в слоях GaN, выращенных в тех же условиях, значения  $L_d$  составляют только 30–40 нм. При этом при выращивании твердых растворов картина дифракции быстрых электронов демонстрирует двумерный режим роста, в то время как при синтезе GaN картина дифракции указывает на образование трехмерных островков. Ростовые «колонны» в слоях твердых растворов имеют размер в плоскости до 10 раз больше, чем в слоях GaN. Таким образом, добавление небольшой доли AlN существенно изменяет режим роста эпитаксиальных слоев и может быть применено для улучшения параметров материала.

## Оптические свойства высокоупорядоченных тонких пленок $V_2O_5$

В.В. Атучин<sup>1,2</sup>, В.Н. Кручинин<sup>1</sup>, С.В. Рыхлицкий<sup>1</sup>, В.А. Кочубей<sup>1,2</sup>,  
Л.Д. Покровский<sup>1,2</sup>, С.В. Ramana<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, пр-т Академика Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> НГУ, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

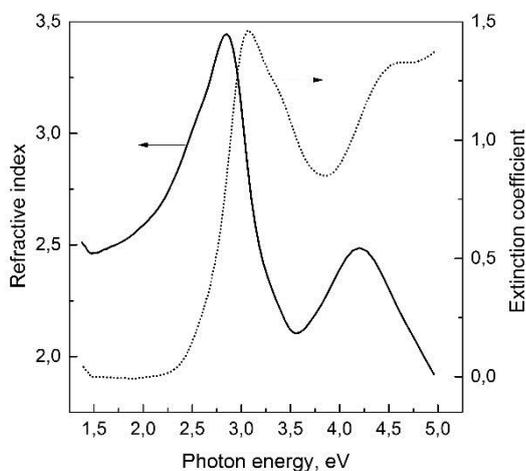
<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Texas at El Paso, El Paso,  
79968 Texas, USA

тел: (383) 330-8946, факс: (383) 333-2771, эл. почта: kruch@isp.nsc.ru

Оксид ванадия ( $V_2O_5$ ) – важный материал для современных нанотехнологий. Благодаря наличию эффекта электрохромизма тонкие пленки на основе  $V_2O_5$  являются потенциальными объектами для создания дисплеев, светофильтров и других оптических и оптоэлектронных приборов [1].

Целью данной работы было исследовать морфологию и оптические свойства тонких пленок оксида ванадия (V), полученных на подложках Si(100) методом магнетронного распыления ванадия в атмосфере  $O_2 + Ar$  ( $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  Па) с различным содержанием кислорода в смеси (30-50%).

Анализ с помощью дифракции быстрых электронов показал, что пленки имеют высокоупорядоченную микрокристаллическую структуру, причем размер зерен и упорядоченность кристаллической фазы оксида возрастают с уменьшением концентрации кислорода в смеси.



Оптические свойства тонких пленок  $V_2O_5$  исследовались с помощью спектральной эллипсометрии в диапазоне энергий фотонов 1.3-4.6 эВ. Решение обратной задачи эллипсометрии в рамках однослойной модели позволило рассчитать дисперсионные зависимости реальной (n) и мнимой (k) частей комплексного показателя преломления  $N = n - ik$  (см. рисунок). При значениях  $E < 2.5$  эВ пленки прозрачны и могут быть успешно описаны дисперсионной моделью Коши, тогда как при более высоких значениях энергии кванта наблюдается увеличение поглощения света с максимумами при  $E \sim 3.1$  и  $E \sim 4.5$  эВ. В этом диапазоне дисперсионные зависимости хорошо описываются осциляторной моделью Дру-

де. Значение k в максимуме поглощения (3.1 эВ) зависит от содержания кислорода в смеси: при высоких значениях содержания кислорода (>40%) величина k не превышала  $\sim 1.5$ , тогда как при низких значениях содержания кислорода величина k достигала  $\sim 2$ . Таким образом, зависимости  $n(E)$  и  $k(E)$  практически совпадали с таковыми для кристаллических образцов  $V_2O_5$  [2], свидетельствуя о высокой упорядоченности структуры тонких пленок, полученных при содержании кислорода в смеси <40%.

### Литература

- [1] C.V.Ramana, R.J.Smith, O.M.Hussain, C.M.Julien, J.Vac.Sci.Technol. **A22**, 2453(2004).
- [2] J.C.Parker, D.J.Lam, Y.-N.Xu, W.Y.Ching, Phys.Rev. **B42**, 5289 (1990).

## Фотоэлектрические свойства пленок оксида цинка легированные редкоземельными металлами

В.В. Малютина-Бронская<sup>1</sup>, А.В. Семченко<sup>2</sup>, В.Б. Залесский<sup>1</sup>

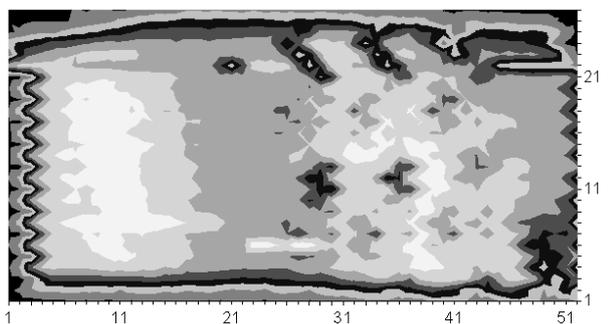
<sup>1</sup> Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Беларусь, г. Минск, 220072, пр-кт Независимости, 68,

<sup>2</sup> Гомельский государственный университет им. Ф.Скорины, 246019, г. Гомель, ул. Советская, 104

тел.: (37517)281-2956; факс (37517)281-3229, эл.почта: v\_malyutina@rambler.ru

Оксид цинка входит в круг полупроводниковых материалов, которые в настоящий период наиболее интенсивно изучаются. Большая энергия связи экситонов ZnO и его сплавов особо привлекательны для создания излучающих устройств и фотоприемников на основе ZnO. Легирование функциональных слоев ZnO различными элементами приводит к модифицированию их свойств. Возможна модификация оптических [1] и транспортных [2] свойств конечного оксидного материала.

Диодные структуры Al-Ni/ZnO:RE(Er,Tb)/Si были получены методом магнетронного напыления и золь-гель методом. Данные LBIC, представленные на рисунке, показали, что



Ток, мкА: ■ 0-0,2 ■ 0,2-0,4 ■ 0,4-0,6 ■ 0,6-0,8 ■ 0,8-1 ■ 1-1,2 ■ 1,2-1,4 ■ 1,4-1,6 ■ 1,6-1,8 ■ 1,8-2

практически вся поверхность исследуемых структур, за исключение областей, где нанесены контактные площадки, фоточувствительна. Максимальное значение фото - ЭДС приходится на длину волны 800 нм и 750 нм для структур Al-Ni/ZnO:Er/Si и Al-Ni/ZnO:Tb/Si, соответственно. Это свидетельствует о том, что основной вклад в возникновение фото - ЭДС вносят носители заряда в результате примесного поглощения. В диапазоне длин волн от 400 нм до 600 нм появляется хвост, связанный с вкладом в фотопроводимость окиси цинка.

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) исследуемых структур представляют собой кривые характерные для высокочастотных ВФХ классических МДП-структур. Емкость структуры меняется не только от приложенного напряжения, но и от освещения. На всех зависимостях при отрицательных напряжениях наблюдается особенность в виде максимума, величина этого максимума зависит от интенсивности освещения. Для вольт-амперных характеристик структур ZnO:RE/Si проявляется фотоэффект при освещении источниками света с различной длиной волны.

Таким образом, в ходе исследования было обнаружено, что фотодиодные структуры ZnO:RE/Si являются чувствительными к излучению широкого спектрального диапазона. Проведенные исследования показывают, принципиальную возможность использования одного материала ZnO в структурах различного назначения (прозрачные контакты, фотодиоды, фотоварикапы), что является потенциально важным достоинством в решении задач интеграции с кремниевой технологией.

### Литература

[1] А. Н. Грузинцев, В. Т. Волков, Е. Е. Якимов ФТП **3**, 6 (2003).

[2] С. Е. Никитин, Ю. А. Николаев, И. К. Полушина ФТП **11**, 37 (2003).

# Анизотропия сверхбыстрого оптического эффекта Керра в GaAs

С.Г. Нефёдов, В.В. Павлов, Р.В. Писарев

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,

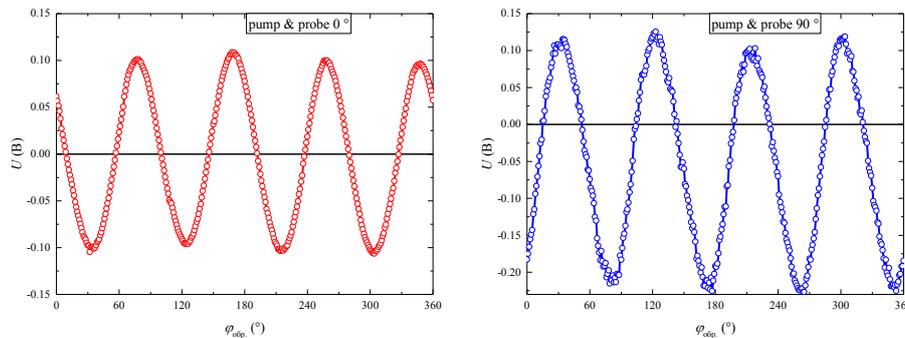
Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

тел: (812) 292-7963, факс: (812) 297-1017, эл. почта: nefed.sg@ya.ru

Использование оптического эффекта Керра с возбуждением ультракороткими лазерными импульсами позволяет проводить исследование динамических процессов в конденсированных средах в широком временном диапазоне от нескольких фемтосекунд до наносекунд. В данной работе проведено исследование анизотропных и динамических свойств сверхбыстрого оптического эффекта Керра в объемном полупроводнике GaAs. Электрооптические эффекты в полупроводниковых кристаллах могут быть описаны следующим разложением тензора диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ij}$  по степеням внешнего электрического поля  $\mathbf{E}$  [1]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{(0)} + \beta_{ijk}^{(1)} E_k + \gamma_{ijkl}^{(2)} E_k E_l + \dots,$$

где тензор  $\beta_{ijk}^{(1)}$  описывает линейный электрооптический эффект Поккельса, который может возникать лишь в нецентросимметричных средах, тензор  $\gamma_{ijkl}^{(2)}$  описывает квадратичный электрооптический эффект Керра, который может возникать в любых средах. Если в качестве внешнего поля используется электрическое поле световой волны, то возникает чисто оптический эффект Керра.



На рисунке представлены результаты исследования сверхбыстрого оптического эффекта Керра в GaAs, измеренного в области перекрытия световых импульсов с использованием метода оптической накачки и зондирования. В установке использована лазерная система Pharos-Orpheus (Light Conversion Ltd.), длительность импульсов 190 фс, частота следования импульсов 5 кГц, мощность 5 мВт (накачка), 7 мкВт (зондирование), длина волны излучения 1030 нм. Представлены результаты для двух случаев – когда поляризации импульсов накачки и зондирования параллельны и перпендикулярны. Наблюдается четырехкратная анизотропия, характерная для плоскости типа (001). Эффект наблюдается в основном в области перекрытия импульсов. Данный эффект может найти применение при создании устройств интегральной оптоэлектроники – сверхбыстрых оптических модуляторов и фазовращателей.

## Литература

[1] И.Р. Шен, в кн. *Принципы нелинейной оптики*, Наука, М. 1989.

## Матричные элементы электрон-фотонного взаимодействия в кристаллической решетке конечной длины

Ю.Г. Пейсахович<sup>1</sup>, А.А. Штыгашев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, 630073, пр. К.Маркса, 20

тел: (383) 346-0677, факс: 007-383-268-0135, эл. почта: shtygashev@corp.nstu.ru

В работе исследована зависимость матричных элементов электрон-фотонного взаимодействия от размера малого кристалла и силы связи электронов в элементарных ячейках для двух случаев: 1) начальное и конечное состояния электрона принадлежат квазидискретному зонному спектру ниже вакуумного уровня (важно для расчета дисперсии проницаемостей, восприимчивостей и прочих оптических характеристик), 2) состояния лежат по разные стороны от вакуумного уровня (важно для расчета распределений токов фотоэмиссии и неупругой дифракции электронов). Для одномерной модели строго решена граничная задача, включая вычисление решеточных сумм и поверхностного вклада, выведены точные компактные формулы для матричных элементов, позволяющие сделать аналитические оценки и числовой расчет указанных зависимостей, а также произвести трехмерные обобщения.

Основные выводы и результаты. В малом кристалле квазиимпульс  $K$  можно строго ввести через матрицу трансляции на период решетки и связать с энергией, в дискретном спектре  $K$ -пространство является неоднородным из-за краевых условий на поверхности. При увеличении длины решетки  $N$  и силы связи удается проследить формирование правил отбора «сохранения суммы импульса фотона и квазиимпульса», а в дипольном приближении - «вертикальности», при переходах, выявить степень их приближенности и отклонения от них в пренебрежении электрон-фононным и электрон-электронным рассеянием. Зависимость матричных элементов от  $N$  в основном формируется произведением вкладов нормировки волновых функций, когерентной решеточной суммы, электронной длины волны де-Бройля и (в случае 2)) амплитуды вероятности проникновения электрона в решетку. Квадраты модуля матричных элементов в зависимости от разности квазиимпульсов состояний мало напоминают размытую  $\delta$ -функцию: эта зависимость сильно изменяется по зоне Бриллюэна, она существенно разная для переходов между разрешенными зонами с номерами одинаковой или разной четности, для переходов между разными комбинациями начальных и конечных состояний вблизи дна, середин и потолков этих зон. В последних случаях квадраты матричных элементов изменяются по степенному закону  $\propto N^n$  с различными характерными целыми положительными или отрицательными показателями  $n$ . Например, в случае 1) для группы переходов, близких к вертикальным  $n = 0$ , для невертикальных переходов  $n = -2$  или  $n = -4$ ; в случае 2) для группы близких к вертикальным переходов в середине зон  $n = 1$ , а у порогов зон  $n = 3$  из-за увеличения амплитуды проникновения в решетку, что может дать для некоторых невертикальных переходов  $n = 1$ , либо  $n = -1$ ,  $n = -3$ .

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 3.338.2014/К.

## Энергетическое строение квантовых точек, сформированных в гетеросистеме InSb/AlAs

К.М. Румынин, Д.С. Абрамкин, А.К. Бакаров, А.К. Гутаковский, Т.С. Шамирзаев  
Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова,  
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13  
тел: (383) 330-69-45, эл. почта: kup9tko@ya.ru

Теоретические расчёты [1] показывают, что в гетеросистеме InSb/AlAs можно ожидать формирование квантовых точек (КТ) с энергетическим спектром первого рода и непрямой запрещённой зоной. Разделение носителей заряда в пространстве квазиимпульсов приводит к длительному времени жизни экситона [2]. Это делает такие КТ перспективными объектами для исследования динамики долгоживущих локализованных экситонов, в частности процессов релаксации спина экситона в КТ. Целью работы является экспериментальное исследование энергетического спектра КТ, сформированных в гетеросистеме InSb/AlAs.

Гетероструктуры с InSb/AlAs КТ были выращены методом молекулярно лучевой эпитаксии. Исследование кристаллического строения гетероструктур с КТ, проведённое методом просвечивающей электронной микроскопии, показало, что, несмотря на большое рассогласование параметров решёток (12.6%), перемешивание материалов снижет рассогласование и приводит к формированию псевдоморфно напряжённых КТ, состоящих из твёрдого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$ .

Были проведены расчёты энергетического строения КТ в зависимости от состава твёрдого раствора. В расчётах учитывалось влияние перемешивания материалов и упругих деформаций на положение энергетических зон. Показано, что в зависимости от состава твёрдого раствора КТ могут иметь энергетическое строение, как первого, так и второго рода. КТ с энергетическим строением первого рода имеют основное электронное состояние в  $X_{xy}$  долине зоны проводимости  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$ . Экспериментальное исследование энергетического строения КТ было проведено методом спектроскопии стационарной и время-разрешённой фотолюминесценции (ФЛ). Род энергетического строения определялся по характеру смещения полосы ФЛ в зависимости от плотности мощности возбуждения ( $P$ ). Отсутствие смещения полосы ФЛ, пропорционального  $P^{1/3}$ , характерного для структур с энергетическим строением второго рода [3], указывает на то, что полученные КТ имеют энергетическое строение первого рода. Длительное затухание ФЛ КТ первого рода, вплоть до 100 мкс, указывает на то, что такие КТ имеют непрямую запрещённую зону в пространстве квазиимпульсов. Из сопоставления результатов теоретических расчётов с экспериментальными данными, был оценён состав твёрдого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$  полученных КТ ( $x=0.2\div 0.5$ ,  $y=0\div 0.2$ ). Таким образом, показано, что в гетеросистеме InSb/AlAs возможно формирование КТ с энергетическим строением первого рода и непрямой запрещённой зоной.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 13-02-00073 и 14-02-31102), стипендиальной программы Президента РФ (№ СП-985.2013.5) и программы Министерства Образования и Науки РФ (№ 16.552.11.7091).

### Литература

- [1] Т. С. Шамирзаев, ФТП **45**, 97 (2011);
- [2] T. S. Shamirzaev, *et. al.*, Phys. Rev. B **84**, 155318 (2011);
- [3] N. N. Ledentsov, *et. al.*, Phys. Rev. B **52**, 14058 (1995).

# Возникновение плато в фотопроводимости 2DEG AlGaAs/GaAs мезоструктур зигзагообразной формы

О.А. Шегай, О.Р. Баютова, А.К. Бакаров

Институт физики полупроводников СОРАН, пр. Лаврентьева, 13,  
г.Новосибирск, 630090, Россия

тел: (383)330-67-33, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [shagai@isp.nsc.ru](mailto:shagai@isp.nsc.ru)

В работе сообщается об обнаружении плато в фотопроводимости (ФП) мезоструктур зигзагообразной формы с 2-мерным электронным газом (2DEG) AlGaAs/GaAs при низкой температуре в присутствии межзонной подсветки. Такое поведение обнаружено для мезоструктур с 2DEG при ширине канала около 6 мкм. Обсуждение наблюдаемого поведения ФП проводится в рамках модели Пайерлса с образованием проводящих краевых состояний.

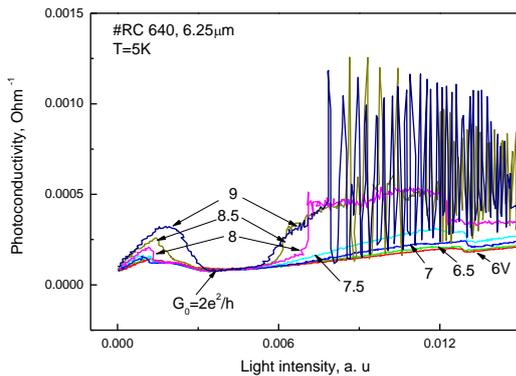


Рис. 1. Зависимость ФП от интенсивности подсветки мезоструктуры зигзагообразной формы с 2DEG:  $U=6-9$  В,  $w=6.25$  мкм,  $T=5$  К.

Для анализа наблюдаемых особенностей ФП мезоструктур зигзагообразной формы с 2DEG используется модель Пайерлса [1], в которой в плотности состояний на уровне Ферми возникает щель. Краевые проводящие состояния ответственны за наблюдение в ФП плато. Неравновесные носители заряда, рожденные между каналами в буферном слое GaAs под действием электрических полей сложной конфигурации локализуются у краевых состояний полосок 2DEG.

## Литература

[1] Р. Пайерлс, Квантовая теория твердых тел. Москва 1956.

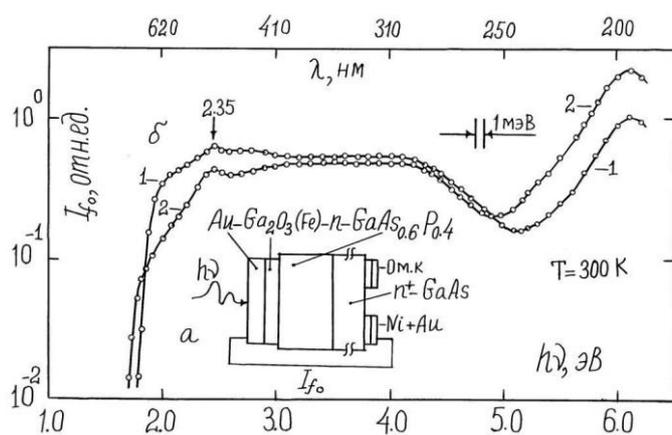
# Фоточувствительность наноструктур Au-окисел-n-GaAs<sub>0,6</sub>P<sub>0,4</sub> в УФ области спектра

Д. Мелебаев

Институт солнечной энергии Академии Наук Туркменистана, Ашхабад  
744000, Сапармурат Туркменбаши шаёлы, 31; [dmelebay@yandex.ru](mailto:dmelebay@yandex.ru)

Барьеры Шоттки металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), изготовленные нанотехнологическими методами, в частности наноструктурированием, начали использоваться в фотоприемниках ультрафиолетового излучения [1].

Настоящая работа посвящена исследованиям фоточувствительности (ФЧ) Au-окисел-n-GaAs<sub>0,6</sub>P<sub>0,4</sub> наноструктур в области энергии фотонов  $h\nu=1,5-6,2$  эВ с целью определения ширины запрещенной зоны оксида Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (E<sub>гох</sub>), легированного железом (Fe), и выяснению влияния оксида железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) на спектр фототока барьеров Шоттки. Объектом исследования служили наноструктуры Au-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Fe)-n-GaAs<sub>0,6</sub>P<sub>0,4</sub>/n<sup>+</sup>-GaAs [(100)-структура №1 и (111) – структура №2]. Технология изготовления МДП наноструктур на основе n-GaAs<sub>0,6</sub>P<sub>0,4</sub> подробно освещена в работе [2]. После химического травления смесью Br<sub>2</sub>(4%)+C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH(96%) с последующей промывкой в этаноле, поверхность n-GaAs<sub>0,6</sub>P<sub>0,4</sub> обрабатывалась этаноловым раствором бромида железа (FeBr<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O). Основные результаты проиллюстрированы на рисунке.



В видимой (2-3 эВ) и УФ (5,6-6,2 эВ) областях спектра обнаружены новые закономерности (рис.б). В длинноволновой части спектра наблюдается максимум  $h\nu_{m1}=2,35$  эВ. Это, по-видимому, связано с образованием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с E<sub>гох</sub>=2,3 эВ на границе раздела (рис.б). В УФ части спектра в интервале 5,0-6,2 эВ наблюдается рост ФЧ с увеличением  $h\nu$ . При освещении  $h\nu>5$  эВ, в диэлектрике (окисле) возникает фототок. Зависимость фототока  $I_{ph}$  в интервале 5,0-6,2эВ оказалась экспоненциальной. Это позволяет по методике [3]

определить E<sub>гох</sub> оксида Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Fe), образованного на поверхности GaAs<sub>0,6</sub>P<sub>0,4</sub>. В полученных нами результатах значение E<sub>гох</sub> для Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Fe) оказалось равным E<sub>гох</sub>~5,1±0,05эВ при 300К. Таким образом, образование на поверхности GaAs<sub>0,6</sub>P<sub>0,4</sub> наноксидного слоя железа создает в наноструктуре Au-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Fe)-n-GaAs<sub>0,6</sub>P<sub>0,4</sub> специфические свойства, имеющие научно-практическое значение.

## Литература

- [1] Д. Мелебаев. Тр.МНТК «Нанотехнологии функциональных материалов», Санкт-Петербург, 115(2010).
- [2] Д. Мелебаев Тр. Совещания «Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2008»» Новосибирск, 67(2008).
- [3] Д. Мелебаев. НАНОТЕХНИКА, инженерный журнал, №2(38), 106(2014).

## Об оптимизации конструктивных параметров ИК микроскопа

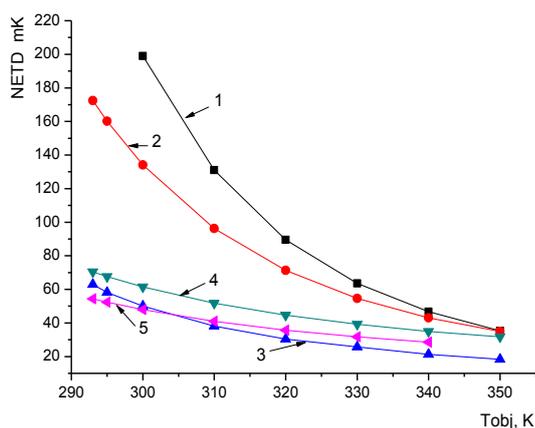
И.И. Ли, И.В. Мжельский, В.Г. Половинкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева 13.  
тел: (383) 330-7781, факс: (383) 330-5256, эл.почта: [irlamlee@isp.nsc.ru](mailto:irlamlee@isp.nsc.ru)

Инфракрасный микроскоп предоставляет уникальную возможность наблюдения с высоким пространственным разрешением температурного микрорельефа на поверхности наблюдаемых объектов [1, 2]. В работе проводится анализ характеристик ИК микроскопа в зависимости от основных конструктивных параметров оптической системы микроскопа и фотоэлектрических параметров ИК ФПУ с целью достижения предельных параметров ИК микроскопа по пространственному и температурному разрешению. При анализе использовались следующие параметры оптической системы и параметры ФПУ [2]:

- диаметр отверстия экранирующего зеркала  $D$ , расстояние от зеркала до фокальной плоскости ФПУ  $L$ , относительное отверстие объектива микроскопа  $D/F$ , коэффициент оптического увеличения  $K$ ;

- размер пикселя ИК ФПУ; спектральный диапазон ИК ФПУ  $\lambda_1 - \lambda_2$ ; квантовая эффективность фотоприемников -  $\eta$ ; температура фона - 293 К; температура исследуемого объекта -  $T_{obj}$ ; зарядовая емкость устройства ввода мультиплексора; уровень собственных шумов мультиплексора.



При расчетах ориентировались на ИК ФПУ форматом 320x256 с мультиплексором ISC9809 с

входным устройством на основе трансимпедансного усилителя с зарядовой емкостью -  $3.5 \cdot 10^6$  электронов, паспортный уровень собственных шумов мультиплексора = 400 электронов. Выбор данного устройства считывания обусловлен тем, что в ИК микроскопе минимизируется апертурное окно на фон, в этом случае для ИК ФПУ на основе прямоинжекционного устройства считывания значительно возрастают требования к динамическому сопротивлению фотодиодов и может привести к возрастанию уровня шумов [3]. На рисунке приведены расчетные зависимости NETD ИК микроскопа от  $T_{obj}$ , где на кривой 1 приведены экспериментальные зависимости из [1].

Кривые 1 -  $D/L=20/84$ ,  $D/F=1$ ,  $\lambda_1 - \lambda_2 - 1.2-3.05$  мкм,  $K=6$ ;  
2 -  $D/L=20/84$ ,  $D/F=1$ ,  $\lambda_1 - \lambda_2 - 1.7-3.5$  мкм,  $K=6$ ;  
3 -  $D/L=20/130$ ,  $D/F=1$ ,  $\lambda_1 - \lambda_2 - 1.2-3.05$  мкм,  $K=3.6$ ;  
4 -  $D/L=20/130$ ,  $D/F=1$ ,  $\lambda_1 - \lambda_2 - 4.5-4.6$  мкм,  $K=3.6$ ;  
5 -  $D/L=20/130$ ,  $D/F=1.2$ ,  $\lambda_1 - \lambda_2 - 4.5-4.6$  мкм,  $K=3.6$ .

### Литература

- [1] А.П. Ковчавцев и др, в кн. Юбилейный сборник избранных трудов института физики полупроводников им. А.В. Ржанова (1964-21014), Новосибирск, 2014, с.478.
- [2] В.М. Базовкин, И.В. Мжельский, Г.Л. Курышев, В.Г. Половинкин. Автотметрия, 2011, Т. 47, № 5, с. 98-102.
- [3] J.V. Gumenjuk-Sichevska, D.D. Karnaushenko, I.I. Lee, and V.G. Polovinkin, Opto-electronics review, 19, no.2, p.63-70, 2011.

## **О путях снижения плотности V-дефектов в гетероструктурах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из Si(310)**

**Д.В. Марин**, М.В. Якушев

ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, Лаврентьева, 13

тел: (383) 330-5501, факс: (383) 330-4967, эл. почта: [marin@isp.nsc.ru](mailto:marin@isp.nsc.ru)

Гетероэпитаксиальная структура  $\text{CdHgTe}/\text{CdTe}/\text{Si}$  является наиболее перспективным материалом для создания полноформатных матричных ИК фотодетекторов, так как позволяют получать фоточувствительный материал большой площади. Эпитаксиальные слои  $\text{CdHgTe}$  (КРТ) на подложках большого диаметра необходимы для создания матричных ИК фотоприемников с большим числом элементов, повышения производительности производства и снижения стоимости изделий. Использование подложек из кремния позволяет получать матричные фоточувствительные элементы, согласованные по коэффициенту термического расширения с кремниевой интегральной микросхемой считывания сигнала (мультиплексором).

Единственным методом позволяющим выращивать эпитаксиальные структуры КРТ на подложках из кремния является метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

При выращивании многокомпонентных полупроводников методом молекулярно-лучевой эпитаксии существуют проблемы, связанные с низкой упругостью паров одного или нескольких компонентов. В случае КРТ, элемент с низкой упругостью паров (теллур) может образовывать при температурах выращивания твердую фазу, что приводит к появлению и разрастанию характерных морфологических v-дефектов с латеральными размерами до нескольких десятков микрон. Высокая плотность v-дефектов увеличивает число дефектных фотодиодов в матрице.

В настоящее время в ИФП СО РАН проведены комплексные исследования всех этапов выращивания гетероэпитаксиальных структур  $\text{CdTe}$  и  $\text{CdHgTe}$  на подложках из кремния ориентацией (310) диаметром до 100 мм. Разработана технология, позволяющая создавать на подложках из кремния пленки  $\text{CdHgTe}$  с плотностью морфологических V-дефектов  $\sim 500 \text{ см}^{-2}$ .

Проведен анализ влияния режимов предэпитаксиальной подготовки и роста на плотность дефектов. Установлено, что плотность дефектов не зависит от соотношения плотности потоков  $\text{Hg}/\text{Te}$ , а определяется температурой роста КРТ, оптимальное значение которой зависит от заданного давления ртути. Кроме того, существенное влияние оказывает качество изготовления и подготовки кремниевой пластины.

Для дальнейшего снижения плотности V-дефектов необходимо:

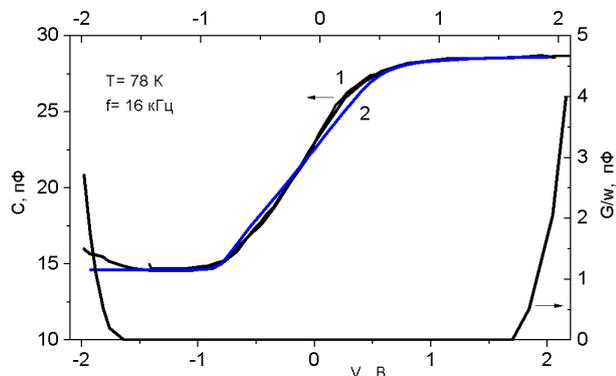
- оптимизировать технологические операции изготовления и подготовки кремниевых пластин;
- разработать способы прецизионного и воспроизводимого контроля температуры роста КРТ;
- снизить уровень неконтролируемых загрязнений на всех этапах технологического процесса.

## Пассивация поверхности HgCdTe тонкими слоями CdTe

А.П. Ковчавцев, А.А. Гузев, **Д.В. Марин**, А.В. Царенко, М.В. Якушев  
ИФП СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
тел: (383)330-55-01, факс: (383) 330-52-56, эл. почта: [yakushev@isp.nsc.ru](mailto:yakushev@isp.nsc.ru)

Пассивация поверхности CdHgTe является важным технологическим процессом при создании фокальных ИК матриц. Как правило пассивация p-n переходов проводится в два этапа. На первом этапе в приповерхностной области активного поглощающего слоя создается варизонный слой с увеличивающейся шириной запрещенной зоны для уменьшения генерационно-рекомбинационных токов на поверхности полупроводника. На втором этапе на поверхность варизонного слоя наносится защитный слой состоящий из широкозонного полупроводника или диэлектрика. Такие слои дополнительно уменьшает утечки тока в местах выхода p-n перехода на поверхность и защищают поверхность варизонного слоя при проведении процессов фотолитографии при изготовлении матриц.

Мы исследовали пассивирующие свойства тонких слоев CdTe толщиной  $\sim 0,25$  мкм. На подложках со слоями  $\text{Cd}_{0,3}\text{Hg}_{0,7}\text{Te}$  ( $\sim 5,7$  мкм), варизонным слоем ( $\sim 0,3$  мкм, составом по  $\text{Cd}_{0,42}$ ) и слоем CdTe фотолитографией изготавливались МДП-структуры (металл – In) с площадью затвора  $\sim 9 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup> и измерялись частотные зависимости адмиттанса. C-V характеристики не имели заметной частотной зависимости в диапазоне 200 Гц – 100 кГц. При приложении к МДП-структурам пилообразного смещения в диапазоне от -3 до 3 В на C-V кривых отсутствовал гистерезис. На рисунке показана типичная высокочастотная C-V кривая (1).



Здесь же показана теоретическая кривая (2), которая вычислена с учетом изменения состава варизонной гетероструктуры и изменения ее зонной диаграммы с напряжением. Расчеты проводились в рамках диффузионно-дрейфовой модели. Из емкости в области инвертирующих смещений была оценена концентрация донорной примеси  $\sim 1,7 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Из емкости в обогащении оценена величина диэлектрической проницаемости слоя CdTe  $\sim 9,1$ . Обращает на себя внимание достаточно

хорошее совпадение между экспериментальной и теоретической кривыми, которое не требует обычно используемого приема – параллельного сдвига теоретической кривой по оси напряжений до совпадения с экспериментальной. Это указывает на отсутствие в МДП-структуре встроенных зарядов в слое CdTe. Также можно сказать об отсутствии на границах раздела поверхностных состояний. Кривые проводимости на переменном сигнале  $G/\omega$  в области смещений больше +1,6 и меньше -1,6 В имеют резкий подъем связанный с туннелированием электронов (дырок) через верхнюю (нижнюю) половину запрещенной зоны пассивирующего слоя CdTe. Подробный анализ туннельных токов может дать дополнительную информацию о зонной диаграмме гетероструктуры и слое CdTe.

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ RFMEFI60414X0134

## Сверхдлинноволновые линейчатые фотоприемники для дистанционного зондирования Земли

Д.В. Бородин<sup>2</sup>, Д.В. Брунев<sup>1</sup>, В.С. Варавин<sup>1</sup>, В.В. Васильев<sup>1</sup>, А.В. Вишняков<sup>1</sup>,  
С.А. Дворецкий<sup>1</sup>, А.В. Предеин<sup>1</sup>, И.В. Сабинаина<sup>1</sup>, Г.Ю. Сидоров<sup>1</sup>,  
А.О. Сусяков<sup>1</sup>, **М.В. Якушев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> ООО "РТК Инпекс", Мытищи, 141013, Силикатная, 39Д

тел: (383) 330-5501, факс: (383) 330-4967, эл. почта: yakushev@isp.nsc.ru

ИК тепловая съемка в диапазоне 11-16 мкм завоевала прочное положение в комплексе дистанционных методов наблюдения за деятельностью людей и техногенными процессами, используются для дистанционного зондирования атмосферы.

Имплантацией бора в гетерозепитаксиальную структуру КРТ р-типа проводимости изготовлены ИК фотодиоды с длинноволновой границей спектральной чувствительности 12 - 13 мкм и измерены их вольтамперных характеристик при температурах от 57 до 78 К. При температуре 78К и обратном смещении -150 мВ темновой ток диодов, составляет 80-120 нА, а фототок от фонового излучения комнатной температуры составляет 50-120 нА. При охлаждении от 78 до 60 К темновой ток диодов снижается примерно в 10 раз. В диапазоне 77-67 К ток следует диффузионно лимитируемой зависимости  $n_i^2(T)$ , ниже 67 К температурная зависимость тока слабее и ближе к  $n_i(T)$ .

Изготовлен макет ИК фотоприемного устройства формата 288×4 фоточувствительных элементов (ФЧЭ) с функцией временной задержки и накопления (ВЗН) и измерены фотоэлектрические характеристики.

При снижении рабочей температуры до 65К, с одновременным уменьшением фоновой нагрузки и увеличением времени накопления, удельная обнаружительная способность  $D_{\lambda_{max}}^*$  по недефектным каналам в максимуме спектральной чувствительности увеличивается в несколько раз и может достигать величины  $4,0 \times 10^{11} \text{ смГц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ .

Впервые разработаны и изготовлены фотоприемные линейки формата 576×4×3 ФЧЭ и фотоприемный модуль в виде сборки фотоприемной линейки формата 576×4×3 ФЧЭ с 3-х канальным кремниевым мультиплексором

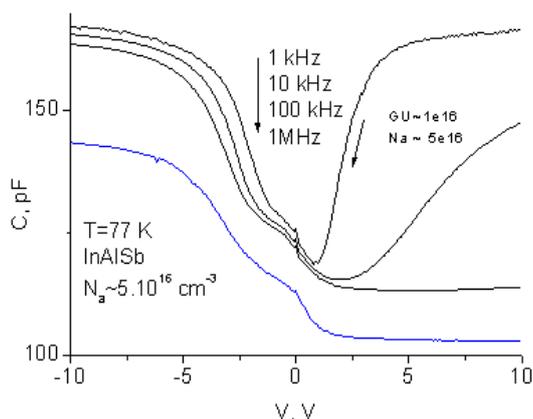
Микросхема мультиплексора, разработана и изготовлена по КМОП технологии 0,35 мкм, 1 поликремний, 3 металла с дополнительными опциями. Основной режим работы - вывод на 12 выходов с частотой до 5 МГц во время интегрирования. Время накопления задается для каждой из трех линеек индивидуально. Ёмкости накопления, из диапазона 0,25 - 4 пФ с шагом в 0,25 пФ, задаются также индивидуально через последовательный порт 12-битным словом.

Среднее значение удельной обнаружительной способности  $D_{\lambda_{max}}^*$  по недефектным элементам (без ВЗН) в максимуме спектральной чувствительности макетного фотоприемного модуля с  $\lambda_{0,5} = 12,0$  мкм при 78 К, измеренное при рабочей температуре 80 К, температуре фона 300 К и с использованием охлаждаемой овальной диафрагмы с апертурным углом 30 градусов составляет величину не менее  $5,0 \times 10^{10} \text{ смГц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ .

## Характеристика слоев InAlSb для ИК фотоприемников, полученных методом МЛЭ

А.К. Бакаров, Н.А. Валишева, К.С. Журавлев, А.П. Ковчавцев,  
**А.Е. Настовьяк**, А.И. Торопов, А.В. Царенко  
ИФП СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
тел: (383)330-52-56, факс: (383) 330-52-56, эл. почта: [nae@isp.nsc.ru](mailto:nae@isp.nsc.ru)

Лучшей фокальной матрицей спектрального диапазона 3-5 мкм является охлаждаемая до температуры жидкого азота матрица р-п переходов на основе полупроводника InSb. К достоинствам матрицы можно отнести высокую однородность фоточувствительных элементов (гистограмма распределения величины NETD 10-20 мК с максимумом ~ 14,5 мК), возможность изготовления матриц большого формата (> 3 миллионов элементов), низкую дефектность матриц ~ 0,2% дефектных элементов. Добавление около 3% алюминия в слой InAlSb понижает темновой ток фоточувствительных элементов примерно в 50 раз и повышает рабочую температуру до 100 К.



В данной работе исследовались электрические свойства слоев InAlSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Слои толщиной от 2 до 5 мкм выращивались в установке Compact-21T на подложках InSb (100), легированных теллуром с концентрацией  $(1-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Калибровка потоков материалов осуществлялась по ионизационному вакуумметру и осцилляциям зеркального пучка в дифракции быстрых электронов на отражение. В качестве реперной точки для определения температуры подложки использовалась температура перехода реконструкции с  $(4 \times 4) \rightarrow (1 \times 3)$  поверхности

InSb (100) в потоке  $\text{Sb}_2$ . Рост проводился в условиях обогащения поверхности сурьмой с соотношением потоков сурьмы и индия как 1,4:1 и температурах подложки 395-410°C.

На подложках со слоями InAlSb изготавливались МДП-структуры и измерялись частотные зависимости C-V характеристик. В качестве диэлектрика использовалась последовательная комбинация низкотемпературных слоев  $\text{SiO}_2$  (~ 195 °C, 75 нм) и нитрида кремния (~ 71 нм). Затвор ( $S = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ) после нанесения слоя  $\text{In}_2\text{O}_3$  (~ 104 нм) формировался методом взрывной фотолитографии. Без введения Al и других примесей на подложках InSb выращивали слои нелегированного InSb толщиной 2 и 5 мкм. Из C-V кривых определялся материал n-типа проводимости с концентрацией донорной примеси ~  $(1,2-1,8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

На выращенных слоях InAlSb толщиной ~ 2 мкм из C-V кривых определялся материал p-типа проводимости с концентрацией акцепторной примеси ~  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . На рисунке показана типичная частотная зависимость C-V характеристик, которая качественно не изменяется при выращивании слоев при введении Al от 1 до 4%. Известно, что Al является изовалентной примесью и не должен являться электрически активной примесью. Возможно, что конверсия материала вызвана формированием точечных дефектов при внедрении Al или фоновой примесью, природа которой пока не установлена.

# Pressure-driven transition from topological insulator into band insulator phase in HgTe quantum well

I. Yahniuk<sup>1</sup>, G. Grabecki<sup>2</sup>, M. Majewicz<sup>2</sup>, J. Wróbel<sup>2</sup>, T. Dietl<sup>2</sup>, G. Cywiński<sup>1</sup>, C. Skierbiszewski<sup>1</sup>, S.S. Krishtopenko<sup>3</sup>, S.A. Dvoretzky<sup>5</sup>, N.N. Mikhailov<sup>5</sup>, F. Teppe<sup>4</sup>, W. Knap<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Institute of High Pressure Physics PAS, 29/37 Sokołowska, Warsaw, Poland

<sup>2</sup> Institute of Physics PAS, al. Lotników, Warsaw, Poland

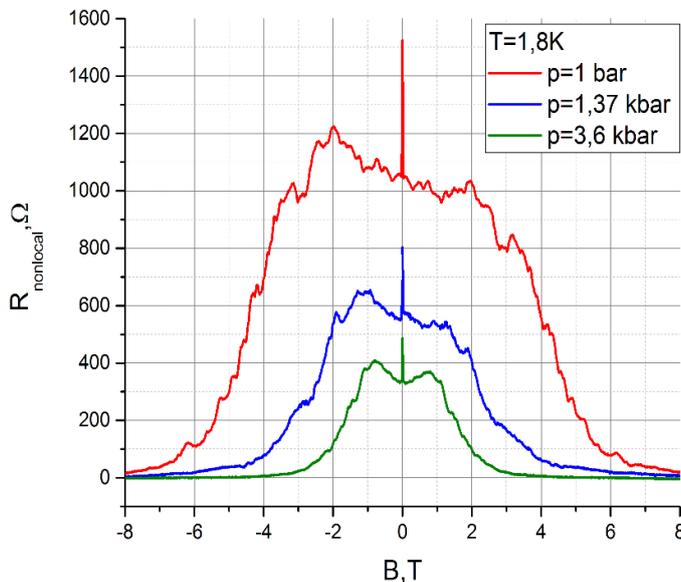
<sup>3</sup> Institute for Physics of Microstructures RAS, GSP-105, 603950, N. Novgorod, Russia

<sup>4</sup> Laboratory Charles Coulomb, Montpellier University & CNRS, Montpellier, France

<sup>5</sup> Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB of RAS, 630090 Novosibirsk, Russia

ivan.yahniuk@unipress.waw.pl

The first topological insulators (TIs) predicted theoretically [1] and, then, confirmed experimentally [2] were based on HgTe quantum wells (QWs). These QWs can be tuned from trivial band insulator (BI) to 2D TI phase by changing the QW thickness  $d$ . If  $d > d_c$  the electron-like subband falls below the heavy-hole like subband and put the system into TI phase. In narrow QWs ( $d < d_c$ ) a conventional BI phase is established. In wide HgTe QWs at  $d > d_c > d_{SM}$  the side maxima of the valence band overlaps with the conduction band, and a semimetallic (SM) phase arises. Recently,



it has been proposed to tune the phase transitions in HgTe QWs by means of hydrostatic pressure [3]. The first pressure experiments on HgTe QWs were focused on the transition from SM phase into TI regime [4].

In this work we report experimental studies of hydrostatic pressure effect on 2D TI based on HgTe/Hg<sub>0.33</sub>Cd<sub>0.67</sub>Te QW with thickness of  $\sim 8$  nm. The nonlocal resistance (ratio of voltage measured at the contacts placed far away from the current injecting contacts) was observed for low pressures, clearly indicating topological insulator state (presence of sample border conducting paths) – see the figure. Important decrease of nonlocal resistance with applying hydro-

static pressure was observed. We attribute this behavior as a first sign of phase transition from TI into BI induced by hydrostatic pressure.

## References

- [1] B.A. Bernevig, T.L. Hughes, and S. C. Zhang, *Science* **314**, 1757 (2006).
- [2] M. König, et al. *Science* **318**, 766 (2007).
- [3] S.S. Krishtopenko, F. Teppe, W. Knap. *Proceedings of the XIX International Symposium "Nanophysics and nanoelectronics"*, Nizhny Novgorod, 2015, vol. 2, p. 547.
- [4] E.B. Olshanetsky, Z.D. Kvon et al., *JETP Lett.* **98**, 843 (2014).

## Адмиттанс структур металл-диэлектрик-полупроводник на основе HgCdTe с приповерхностными широкозонными слоями, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии

А. В. Войцеховский<sup>1,2</sup>, С. Н. Несмелов<sup>1,2</sup>, С. М. Дзядух<sup>1,2</sup>, В. С. Варавин<sup>3</sup>,  
С. А. Дворецкий<sup>1,3</sup>, Н. Н. Михайлов<sup>3</sup>, М. В. Якушев<sup>3</sup>, Ю. Г. Сидоров<sup>3</sup>, Г. Ю. Сидоров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Томск, 634050, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup>Сибирский физико-технический институт НИ ТГУ, Томск, 634050, пл. Новособорная, 1

<sup>3</sup>Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Акад Лаврентьева, 3  
тел: (3822) 41-27-72, факс: (3822) 41-27-72, эл. почта: vav43@mail.tsu.ru

Рабочие характеристики высокочувствительных матриц фокальной плоскости инфракрасного диапазона на основе HgCdTe во многом определяются свойствами пассивирующего покрытия. Характеризацию свойств такого покрытия невозможно провести при помощи традиционных методик обработки результатов измерений электрофизических характеристик тестовых МДП-структур, что связано с наличием в МЛЭ HgCdTe приповерхностных варизонных слоев с повышенным содержанием CdTe, которые выращиваются для оптимизации характеристик инфракрасных детекторов [1]. В данной работе представлены результаты исследований адмиттанса МДП-структур на основе МЛЭ  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.19-0.38$ ) при температурах 8-200 К в диапазоне частот тестового сигнала 1-1000 кГц. Выявлены особенности гистерезиса инжекционного типа, присущего электрофизическим и фотоэлектрическим характеристикам МДП-структур на основе варизонного HgCdTe [2, 3]. Установлено, что вольт-фарадные характеристики МДП-структур на основе HgCdTe с варизонными слоями при 77 К при частоте, превышающей 10 кГц, имеют высокочастотный вид относительно времен перезарядки поверхностных состояний. Исследованы релаксационные процессы в МДП-структурах на основе МЛЭ  $n\text{-Hg}_{0.62}\text{Cd}_{0.38}\text{Te}$  при импульсном изменении напряжения на электроде. Показано, что дифференциальное сопротивление области пространственного заряда в режиме сильной инверсии принимает наибольшие значения для МДП-структур на основе HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs(013) [4].

### Литература

- [1] В.М. Осадчий, А.О. Сусяков, В.В. Васильев и С.А. Дворецкий, Физика и техника полупроводников **33**, 293 (1999).
- [2] A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, and S.M. Dzyadukh, Thin Solid Films **522C**, 261 (2012).
- [3] A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, and S.M. Dzyadukh, Thin Solid Films **551**, 92 (2014).
- [4] A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, S.M. Dzyadukh, V.V. Vasil'ev, V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, and M.V. Yakushev, Infrared Physics & Technology **71**, 236 (2015).

## Исследование оптических характеристик эпитаксиальных слоёв InGaAsP

Н.М. Куляхтина<sup>1,2</sup>, А.В. Никонов<sup>1,2</sup>, К.О. Болтарь<sup>1,2</sup>, Н.И. Яковлева<sup>1</sup>

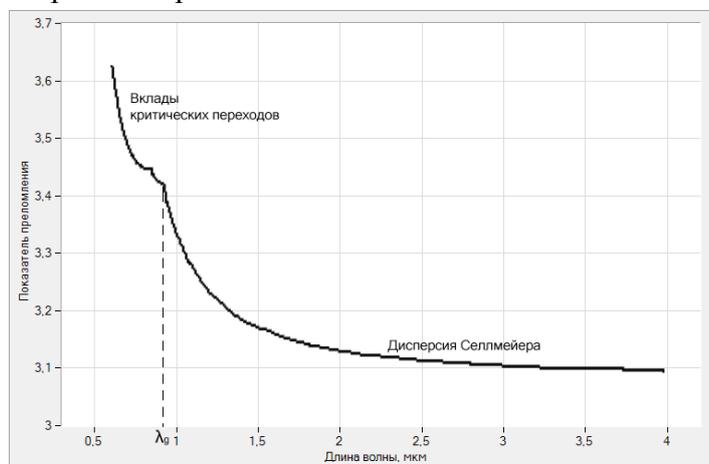
<sup>1</sup> МФТИ (ГУ), г. Долгопрудный, МО, Институтский пер., д. 9, 141700

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

тел: (499) 374-4900, эл. почта: orion@orion-ir.ru

Четверные гетероэпитаксиальные структуры InGaAsP, выращенные на подложке InP, активно используются в р-і-n-фотодиодах для создания нового поколения лавинных фотоприемников оптического диапазона 1,2-1,6 мкм [1, 2]. Данный материал обладает прямозонной структурой, что обеспечивает высокий коэффициент поглощения. Благодаря современным методам эпитаксиального выращивания обеспечивается приемлемая морфология поверхности и высокое структурное совершенство материала с минимальной плотностью дефектов.

Исследователями [3] построены эмпирические зависимости показателя преломления от длины волны для различных составов структур  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ . Большинство этих зависимостей описывают поведение показателя преломления для энергий, значения которых меньше ширины запрещенной зоны.



Предложен метод вычисления показателя преломления и коэффициента поглощения для двойных соединений группы  $A_3B_5$  со структурой цинковой обманки (InP, InAs, GaAs, GaP) и четверных соединений InGaAsP для энергий выше и ниже края фундаментального поглощения. На рисунке представлена зависимость показателя преломления от длины волны на полном рабочем спектральном диапазоне. Аналитическая модель учитывает прямые межзонные переходы и применима для расчета

оптических констант с учётом разных факторов (температурных зависимостей, степени легирования). Проведенные исследования являются перспективными для моделирования показателя преломления и коэффициента поглощения материала InGaAsP/InP различных составов в диапазоне длин волн 0,5-4,0 мкм и создания инструмента контроля оптических характеристик многослойных гетероэпитаксиальных структур, применяемых в фотоприемниках нового поколения.

### Литература

- [1] А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко. *Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники*. Физматкнига, М. 2010.
- [2] Н.И. Яковлева, К.О. Болтарь, М.В. Седнев, *Успехи прикладной физики* **4**, 2 (2014), с.374-382.
- [3] S. Adachi, *J. Appl. Phys.* **12**, 66 (1989), p.6030.

## Исследование спектральных характеристик многослойных гетероэпитаксиальных структур ИК- и УФ-диапазонов

А.В. Никонов<sup>1,2</sup>, К.О. Болтарь<sup>1,2</sup>, И.Д. Бурлаков<sup>1,3</sup>, Н.И. Яковлева<sup>1</sup>

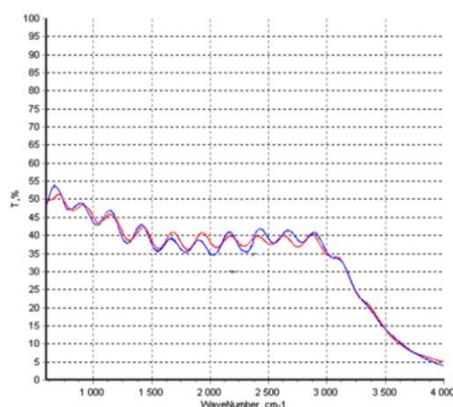
<sup>1</sup> АО «НПО «Орион», г. Москва, ул. Косинская, д. 9, 111538

<sup>2</sup> МФТИ (ГУ), г. Долгопрудный, МО, Институтский пер., д. 9, 141700

<sup>3</sup> МГТУ МИРЭА, Москва, просп. Вернадского, д. 78, 119454

тел: (499) 374-4900, эл. почта: orion@orion-ir.ru

В последние годы в связи с совершенствованием технологии производства фотоприемных устройств с фотодиодными матрицами, предназначенных для детектирования излучения в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах спектра, актуальной является задача контроля оптических и спектральных характеристик фотоприемников. Для создания фотодетекторов «солнечно-слепого» и «видимо-слепого» УФ-диапазонов наиболее пригодным и легко приспособляемым является материал соединения AlGaN [1]. Наиболее высокая чувствительность оптических систем в ИК-диапазоне достигается при использовании фотоприемных устройств на основе CdHgTe [2].



В современных гетероэпитаксиальных структурах твердых растворов исследуемых полупроводниковых соединений присутствуют буферные, варизонные слои, а также рабочие фоточувствительные слои различного состава; поэтому становится необходимым использовать сложные математические модели, учитывающие свойства перечисленных слоёв. В исследовании разработаны методики моделирования спектров пропускания и отражения многослойных гетероэпитаксиальных структур на основе КРТ и AlGaN.

Для моделирования спектров пропускания разработаны и улучшены модели показателя преломления и коэффициента поглощения исследуемых материалов. Модели демонстрируют свою эффективность для анализа гетероэпитаксиальных структур с толщиной отдельных слоёв в несколько сотен нанометров и находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными из независимых источников [3].

На рисунке представлены спектры пропускания и проведена оценка влияния буферных и варизонных слоев для ГЭС КРТ, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии.

### Литература

- [1] А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. Физматкнига, М. 2011.
- [2] А.М. Филачев, А.В. Никонов, К.О. Болтарь, Прикладная физика 6 (2013), с.37-41.
- [3] U. Ozgur, N. Everitt, Applied Physics Letters **79**, 25 (2001), p.4103-4105.

## Пассивация поверхности HgCdTe тонкими пленками Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> полученными методом атомно-слоевого осаждения из ТМА

Г.Ю. Сидоров, И.В. Сабина, В.В. Васильев,  
А.П. Ковчавцев, А.Е. Настовьяк, А.В. Царенко  
Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В.Ржанова,  
Новосибирск, 630090, Пр. Ак. Лаврентьева 13

Пассивация поверхности HgCdTe является важным технологическим процессом при создании фокальных ИК матриц.

Были исследованы пассивирующие свойства тонких слоев окиси алюминия толщиной ~ 80 нм, полученных методом ALD окислением триметилалюминия (Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) удаленной кислородной плазмой при температуре 120 °С. В работе исследовались МДП структуры типа р(или n)-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te (x~0,22)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/In. Часть исходных пленок КРТ имела на поверхности варизонный слой состава x~0,45 и толщиной ~ 0,4 микрон, с других образцов варизонный слой был удален.

Диэлектрик наносился как на пленки с варизонным слоем,

Измерялись частотные зависимости в диапазоне 1 МГц–1 кГц и температурные зависимости в диапазоне 77-300 К C-V характеристик.

МДП структуры на образцах р-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te без варизонного слоя. Величина относительной диэлектрической проницаемости оценивается величиной  $\epsilon_i \approx 7$ . Величина встроенного в окисле заряда в отсутствие напряжения оценивалась величиной  $\approx +2,5 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>. C-V кривая на частоте 1 МГц при T=77 К имела характерный высокочастотный вид. Величина захваченного заряда на ловушки в диэлектрике в области смещений  $\pm 0.5$  В составлял величину  $\approx +3 \cdot 10^{-9}$  Кл/см<sup>2</sup>. При увеличении смещения до  $\pm 25$  В в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> накапливался заряд величиной  $\approx +2,2 \cdot 10^{-7}$  Кл/см<sup>2</sup>. Трансформация частотных и температурных зависимостей C-V характеристик качественно соответствовала теоретическим расчетам, которые проводились в рамках диффузионно-дрейфовой модели, в которой самосогласованно решалась система уравнений Пуассона и непрерывности для электронов и дырок. Влияние поверхностных состояний не учитывалось.

МДП структуры на образцах р-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te с варизонным слоем. Общее поведение частотных и температурных зависимостей C-V кривых было аналогично предыдущему случаю. Экспериментальные C-V смещены относительно теоретических зависимостей и соответствуют положительному заряду в окисле величиной  $+8,2 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>. Основное отличие заключалось в существенно более растянутом по напряжению минимуму низкочастотных C-V кривых, что не описывалось в рамках использованной теоретической модели.

МДП структуры на образцах n-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te без варизонного слоя. Напряжение плоских зон близко к нулю, что свидетельствует об отсутствии встроенного заряда в диэлектрике. В отличие от предыдущих случаев, C-V кривые на частоте 1 МГц имели среднечастотный вид с минимумом емкости и увеличением емкости в инверсии. Теоретические зависимости частотных и температурных зависимостей удовлетворительно описывали экспериментальные данные.

МДП структуры на образцах n-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te с варизонным слоем. Экспериментальные C-V кривые были растянуты по оси напряжений относительно теоретических зависимостей и имели большую величину петли гистерезиса, что указывает на сильный захват заряда в диэлектрике. При этом по-видимому реализуется ситуация с закреплением уровня Ферми на приповерхностных ловушках. В области инверсии при частоте 1 МГц C-V кривая имела среднечастотный вид и при понижении частоты до 10 кГц плавно переходила в низкочастотный вид.

# Оптимизация технологии формирования многоэлементных матричных ИК-фотоприемников на основе МЛЭ слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Н.Х. Талипов<sup>1</sup>, А.В. Войцеховский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл. 141190, пл. ак. Введенского, 1

<sup>2</sup> Томский государственный университет, Томск, 634050, ул. Ленина, 36  
тел: (926)246-5396, эл. почта: [niyazt@yandex.ru](mailto:niyazt@yandex.ru)

В технологии создания многоэлементных матричных фотоприемников (МФП) на основе гетероэпитаксиальных МЛЭ слоев  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (ГЭС КРТ МЛЭ)  $p$ -типа с целью формирования  $n$ - $p$  переходов применяется как ионная имплантация  $\text{B}^+$ , так и низкоэнергетическое ионно-лучевое травление (ИЛТ) ионами  $\text{Ag}^+$ . Оба этих процесса приводят к *in-situ* образованию  $n^+n^-p$  структуры в ГЭС КРТ МЛЭ  $p$ -типа, однако, есть принципиальные различия в процессах ИЛТ и ионной имплантации.

Ионная имплантация – процесс контролируемый, глубина  $n$ - $p$  перехода (глубина  $n^-$ -слоя) зависит от дозы и энергии ионов  $\text{B}^+$  и, как было нами установлено, имеет в ГЭС КРТ МЛЭ величину  $d_n = 2-3$  мкм при  $E = 20-50$  кэВ и  $D = 3 \cdot 10^{13}-3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Ионно-лучевое травление  $\text{Ag}^+$  – сложный, трудно контролируемый процесс, при котором происходит одновременное распыление поверхности и  $p \rightarrow n$  конверсия ГЭС КРТ МЛЭ на всю глубину. В отличие от ионной имплантации, при которой в области проецированного пробега ионов бора ( $R_p$ ) – максимума структурных нарушений, происходит частичная аннигиляция на стоках генерируемых высокоподвижных донорных дефектов ( $\text{I}_{\text{Hg}}$ ), что ограничивает глубину  $n^-$ -слоя, тогда как у процесса ИЛТ таких стоков в объеме ГЭС КРТ МЛЭ нет. Поэтому генерируемая в процессе ИЛТ в приповерхностной области кристалла  $\text{I}_{\text{Hg}}$  в большом количестве беспрепятственно быстро диффундирует в объем, формируя глубокий  $n^-$ -слой.

Планарная технология создания МФП включает в себя важнейшую операцию – нанесение пассивирующего покрытия на предварительно подготовленную поверхность ГЭС КРТ МЛЭ. В качестве диэлектрических покрытий, как правило, используются тонкие слоистые сэндвичи  $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ , а также  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CdTe}$  и  $\text{ZnS}$ . После подготовки поверхности и нанесения диэлектрика проводится имплантация ионов  $\text{B}^+$  в окна в маске из фоторезиста для формирования матричных  $n^+n^-p$  переходов и охранной области для уменьшения фотоэлектрической связи между ними. Энергия ионов  $\text{B}^+$  подбирается таким образом, чтобы их пробег в пленке диэлектрика превышал ее толщину. Например, для пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 100 нм потери энергии ионов  $\text{B}^+$  составляют 50 кэВ. Поскольку состав поверхностных варизонных слоев МЛЭ КРТ лежит, как правило, в интервале  $x = 0,4-0,6$  для формирования малошумящих омических контактов к  $n$ - $p$  переходу, лежащем в рабочем слое ГЭС КРТ МЛЭ с  $x = 0,22$ , необходимо стравить широкозонный варизонный слой. Вместо слабо контролируемого процесса жидкостного травления контактных окон микронного размера в диэлектрике и в варизонном слое (используются разные химические травители), при котором неизбежен латеральный уход размеров, для одновременного вскрытия контактных окон в диэлектрике и в варизонном слое можно применять “сухое травление”, осуществляемое методом ИЛТ низкоэнергетичными с  $E \sim 1$  кэВ ионами  $\text{Ag}^+$  без изменения параметров предварительно сформированной имплантацией ионов  $\text{B}^+$   $n^+n^-p$  структуры, поскольку глубина  $n^-$ -слоя при этом не увеличивается за счет блокировки диффузии  $\text{I}_{\text{Hg}}$  дефектами-стоками в окрестности  $R_p$ . Использование ИЛТ  $\text{Ag}^+$  вместо жидкостного травления контактных окон существенно упрощает процесс изготовления МФП методом ионной имплантации бора.

## Выращивание гетероструктур $A^{III}B^V$ на подложках кремния методом МЛЭ для фотоэлектрических преобразователей

М.О. Петрушков, Е.А. Емельянов, М.А. Путято, Б.Р. Семягин,  
Н.А. Паханов, О.П. Пчеляков, В.В. Преображенский  
ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13  
тел: (383)333-19-676, факс: (383)333-35-02, эл. почта: pvv@isp.nsc.ru

Создание приборов микро-, нано- и фотоэлектроники на основе материалов  $A^{III}B^V$ , выращенных на подложках Si, является одной из приоритетных задач современного полупроводникового материаловедения. Решение этой проблемы крайне важно и для развития высокоэффективной фотовольтаики.

Сложность выращивания слоев  $A^{III}B^V$  на Si приборного качества обусловлена большим рассогласованием постоянной решетки (4,1 % для системы GaAs/Si) и линейного коэффициента термического расширения (до 50%) кремния с материалами  $A^{III}B^V$ . Различия в указанных параметрах обуславливают возникновение прорастающих дислокаций в эпитаксиальных пленках соединений  $A^{III}B^V$ . Один из путей получения гетерослоев с низкой плотностью пронизывающих дислокаций является снижение температуры зарождения и роста слоя  $A^{III}B^V$ . В этом отношении наиболее подходящей эпитаксиальной технологией является метод молекулярно лучевой эпитаксии, позволяющий выращивать арсенид галлия при температуре 150-200°C.

В данной работе рассмотрены проблемы технологии выращивания методом МЛЭ гетероструктур соединений  $A^{III}B^V$ /Si, пригодных для создания солнечных элементов (СЭ): подготовка поверхности подложек кремния к эпитаксии в установке МЛЭ  $A^{III}B^V$ , зарождение слоев  $A^{III}B^V$  заданной ориентации, выращивание буферных слоев, совмещение элементов технологии соединений  $A^{III}B^V$  и Si в одном ростовом комплексе и др.

Методом МЛЭ выращены структуры однокаскадных GaAs СЭ на подложках Si. Буферные слои отличались кристаллографической ориентацией ((001 или 00-1)), наличием или отсутствием дислокационных фильтров, а также числом операций термоциклирования. Из выращенных структур были изготовлены СЭ и проведено измерение их характеристик. Из сравнения ВАХ ячеек СЭ, выращенных на буферных слоях GaAs/GaP/Si, следует, что:

Использование буферных слоев с ориентацией (00-1) приводит к резкому снижению напряжения холостого хода СЭ;

Введение дислокационного фильтра ведет к повышению напряжения холостого хода СЭ, по сравнению со структурой без дислокационного фильтра. Это обусловлено снижением плотности прорастающих дислокаций;

Введение в технологический маршрут дополнительного циклического отжига позволяет существенно повысить напряжение холостого хода СЭ.

Обсуждаются возможные пути улучшения качества буферных слоев  $A^{III}B^V$ /Si такие как: выращивание гомоэпитаксиальных буферных слоев на подложках Si перед проведением операций зарождения и эпитаксией слоев соединений  $A^{III}B^V$ ; оптимизация системы дислокационных фильтров в сочетании с проведением более высокотемпературных циклических отжигов; использование подложек кремния с нанорельефом.

# Кремний-силицидные нанокompозитные фотодетекторы ближнего инфракрасного диапазона

А.В. Шевлягин<sup>1</sup>, Н.Г. Галкин<sup>1</sup>, Д.Л. Горошко<sup>1</sup>, А.К. Гутаковский<sup>2</sup>

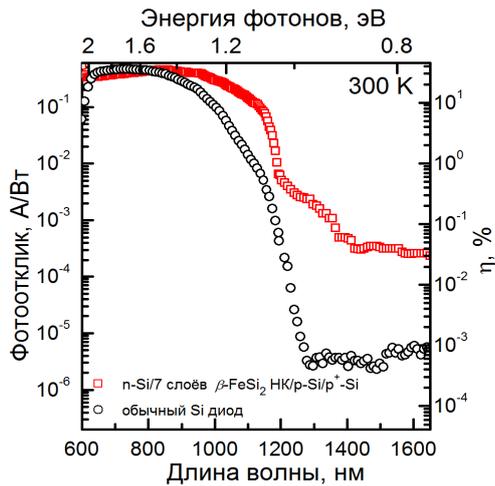
<sup>1</sup> Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, 690041, Радио 5

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. Ржанова СО РАН,

Новосибирск, 630090, проспект Лаврентьева 1

тел: (423) 232-0682, факс: (423) 231-0452, эл. почта: shevliagin@mail.ru

Детектирование оптических сигналов на длинах волн в 1.3 и 1.55 мкм является одной из важнейших задач для оптических систем коммуникации и создания оптических межсоединений для интегральных схем. Кроме того, основное требование для дальнейшего развития оптоэлектроники – это создание эффективных источников и приёмников излучения, которые были бы совместимы с современной кремниевой технологией. Последнее требования практически сводит на нет заметные успехи в создании эффективных фотодетекторов на основе материалов A<sub>III</sub>B<sub>V</sub>. В виду перечисленных требований и недостатков, применение полупроводниковой фазы дисилицида железа ( $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>) в качестве дополнительного активного элемента в кремниевых приборах открывает ряд преимуществ, поскольку  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> обладает шириной запрещённой зоны в 0.8 – 0.9 эВ. Целью данной исследовательской работы является разработка и создание кремниевых фотодиодов, которые обладают расширенным, по сравнению с обычными, диапазоном фоточувствительности и лишены недостатков, характерных для системы Si/плёнка  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>.



*Фотоотклик кремний-силицидной диодной структуры в сравнении с кремниевым диодом без встроенных кристаллитов.*

Для реализации этого происходит эпитаксиальное формирование нанокристаллитов (НК)  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> непосредственно в области кремниевого p-n перехода в условиях сверхвысокого вакуума. Изготовленные фотодиоды демонстрируют фотоотклик при комнатной температуре в 1.7 мА/Вт (Рис. 1) и детектирующую способность  $1.2 \times 10^9$  см<sup>2</sup>Гц<sup>1/2</sup>/Вт без приложения смещения на длине волны 1300 нм. Фоточувствительность в режиме лавинного пробоя достигает 70 мА/Вт, внешняя квантовая эффективность 6.6% при коэффициенте лавинного умножения равном 5.

стрируют фотоотклик при комнатной температуре в 1.7 мА/Вт (Рис. 1) и детектирующую способность  $1.2 \times 10^9$  см<sup>2</sup>Гц<sup>1/2</sup>/Вт без приложения смещения на длине волны 1300 нм. Фоточувствительность в режиме лавинного пробоя достигает 70 мА/Вт, внешняя квантовая эффективность 6.6% при коэффициенте лавинного умножения равном 5.

## Исследования поглощающих покрытий холодных диафрагм в фотоприёмных устройствах ИК диапазона

**П.П. Добровольский, Л.С. Марченко, П.А. Алдохин**  
Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», г. Новосибирск, 630090, пр-кт Ак. Лаврентьева, 2/1  
тел. (383) 330-97-49, эл. почта: [porfir@ngs.ru](mailto:porfir@ngs.ru)

В настоящее время в науке и технике нашли широкое применение тепловизионные приборы (ТВП) на основе охлаждаемых фотоприемных устройств (ФПУ). Одним из основных узлов ТВП является фотоприемник в криостате с охлаждаемой диафрагмой. Для улучшения характеристик ФПУ таких как: минимальная разность температур эквивалентная шуму возникает необходимость уменьшать паразитное фоновое инфракрасное излучение (ИК) отраженное от внутренних стенок охлаждаемой диафрагмы криостата.

Для уменьшения паразитного фонового ИК излучения необходимо разработать поглощающее покрытие, которое должно обладать следующими требованиями:

- иметь коэффициент поглощения в диапазоне 3-5 мкм и 8-12 мкм не менее 90%;
- обладать высокой адгезией к материалу охлаждаемой диафрагмы (ковар);
- обладать низким газоотделением в условиях вакуума от  $10^{-4}$  до  $10^{-6}$  мм. рт. ст.;
- быть устойчивым к перепаду температур от -196 С до 120 С.

В докладе приведены результаты экспериментальных исследований различных образцов покрытий поглощающих ИК излучение, используемых для внутренних поверхностей охлаждаемых диафрагм. Известны ряд покрытий [1,2], которые по ряду показателей не удовлетворяют нашим требованиям.

В результате проведенных исследований было разработано покрытие на основе криогенностойкого лака с графитом, которое удовлетворяет выше указанным требованиям, при этом разработанное покрытие обладает простой технологией нанесения и малой себестоимостью.

### *Литература*

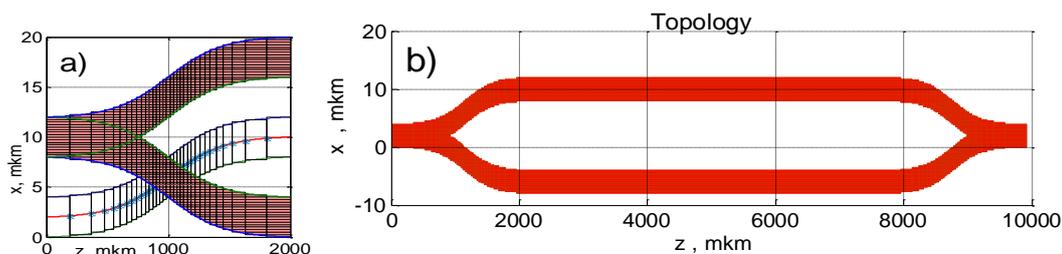
- [1] В.И. Салин. Калибровочный излучатель космического сканирующего ИК радиометра // Оптический журнал, 1998. Т. 65. № 5. С. 101–103.
- [2] А.А. Жуков, А.С. Корпухин, В.П. Лаврищев, О.А. Дюкарева, О.Ю. Казанцев. Способ изготовления поглощающего покрытия // Патент РФ на изобретение № 2503103. 2012.

# Анализ тонких оптических эффектов с помощью метода линий для интерферометра Маха-Цендера на основе Y-разветвителей

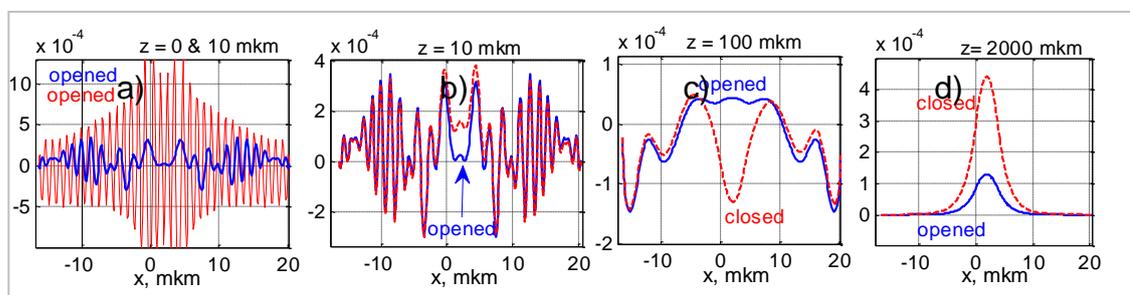
Е.А. Колосовский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090  
тел: (383) 330-4672, факс: (383) 333-2771, эл. почта: kolos@isp.nsc.ru

Метод линий (MoL) является полуаналитической матричной методикой [1], используемой при расчёте оптических структур разного типа. Его суть состоит в связывании последовательности различных слоисто-однородных сред друг с другом через аналитические решения, что обеспечивает высокую точность и скорость анализа. В данной работе метод линий применен к анализу тонких эффектов при работе интерферометра Маха-Цендера на основе Y-разветвителей в полимерных волноводах (см.Фиг.1).



Фиг. 1. Исследование интерферометра Маха-Цендера методом линий. (а) Y-разветвитель, (б) топология интерферометра Маха-Цендера.



Фиг. 2. Структура отраженного поля на разных удалениях от левого торца Y-разветвителя для открытого и закрытого состояний интерферометра.

Мы сравнили полное поле при двух состояниях интерферометра Маха-Цендера - открытом и закрытом (см. Фиг.2). Можно видеть, что амплитуда отраженного поля ( $TE_0$  моды) очень мала ( $\sim 10^{-4}$ ) и в закрытом состоянии в 16 раз выше по мощности, чем для открытого состояния. Для прошедшей волны поле  $TE_0$  моды в закрытом состоянии близко к нулю, однако наблюдается большой поток энергии в области волновода, что может приводить к высокому уровню паразитного сигнала. Наблюдение малых амплитуд поля и их различия свидетельствует о высокой точности аналитической методики MoL, которую целесообразно использовать для анализа тонких эффектов в фотонных структурах [2].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-29-0812014.

## Литература

- [1] U. Rogge and R. Pregla, "Method of lines for the analysis of dielectric waveguides," J. Lightwave Technol. **11**, 2015 (1993).
- [2] A.V. Tsarev, E.A. Kolosovskii, "Analysis of light propagation for a crossing of thin silicon wires using vertical tunnelling coupling with a thick optical channel waveguide", Quantum Electron **43**, 744 (2013).

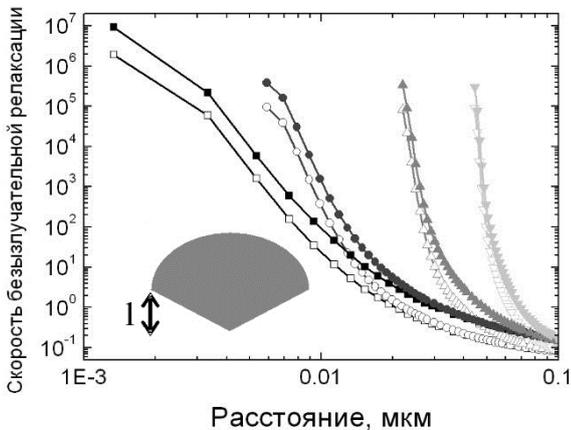
# Влияние формы металлической частицы на экситон-плазмонное взаимодействие с точечным диполем

А.А. Лямкина<sup>1</sup>, С.П. Мощенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова,  
Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 13

тел: (383)330-69-45, факс: (383)330-69-45, эл. почта: lyamkina@isp.nsc.ru

Взаимодействие плазмонных мод в металлических наночастицах с полупроводниковыми квантовыми точками (КТ) представляет большой интерес для нанофотоники и квантовой оптики. Для эффективного экситон-плазмонного взаимодействия требуется уменьшить расстояние между плазмонной частицей и излучателем. Однако, при этом уменьшение расстояния между КТ, сформированной в матрице, и поверхностью, на которой сформирован кластер, может привести к деградации оптических свойств излучателей. Например, оптический сигнал из InAs/GaAs КТ сильно зависит от толщины буферного слоя [1]. Формирование конуса травления под металлическим кластером, сформированным в росте молекулярно-лучевой эпитаксии, представляет собой удобный способ повышения эффективности передачи энергии от излучателя к плазмонной моде без увеличения негативного влияния поверхности. В работе с помощью численного моделирования изучено влияние формы кластера на взаимодействие с точечным диполем.



Зависимость скорости безызлучательной релаксации диполя от расстояния до основания капли для различных глубин конуса травления  $l$ : ■  $l=0$ , ●  $l=5$  нм, ▲  $l=21$  нм, ▼  $l=44$  нм

На рисунке показаны зависимости скорости безызлучательной релаксации дипольного излучателя, расположенного на оси симметрии, от расстояния до основания кластера. При увеличении глубины конуса травления скорость безызлучательной релаксации значительно изменяется. Увеличение скорости в 100 раз для капли происходит на расстоянии от поверхности 10 нм, для кластеров с конусами травления глубиной 5, 21 и 44 нм соответствующие расстояния составляют уже 13, 28 и 50 нм. Формирование конуса представляет собой удобный способ уменьшения влияния поверхности структуры на оптические свойства КТ, при этом сохраняя достаточно сильное экситон-плазмонное взаимодействие. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации взаиморасположения излучателей и металлической частицы в экспериментальных системах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-02-00959). ААЛ выражает благодарность за предоставление финансовой поддержки в виде стипендии Президента РФ СП-805.2013.3 и стипендии Российского Квантового Центра.

## Литература

- [1] E.F. Duijs, F. Findeis, R.A. Deutschmann et al, phys. stat. sol. b. V.224, P.871 (2001).
- [2] АА. Lyamkina, S.P. Moshchenko. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, V.156, P.12–16 (2015).

## Нелинейно-оптические свойства хромофорсодержащих полиимидов и электрооптические устройства на их основе

А.Э. Симанчук<sup>1</sup>, С.Н. Атутов<sup>1</sup>, Н.А. Валишева<sup>2</sup>, С.Л. Микерин<sup>1</sup>,  
А.И. Плеханов<sup>1</sup>, В.А. Сорокин<sup>1</sup>, А.В. Якиманский<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
тел: (383) 3333-174, эл. почта: *simmk@yandex.ru*

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
630090, пр. Ак. Лаврентьева 13, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт высокомолекулярных соединений РАН,  
199004, г. Санкт-Петербург, В.О., Большой проспект., д.31

Хромофорсодержащие полимеры обладают огромным потенциалом с точки зрения формирования на их основе различных электрооптических и фотонных устройств, таких как оптические переключатели, электрооптические модуляторы и устройства оптической логики. Упорядоченные внешним полем пленки указанных материалов демонстрируют квадратичные оптические нелинейности, на один-два порядка превышающие аналогичные в твердотельных неорганических кристаллических структурах. Указанная высокая нелинейность позволяет на порядок снизить рабочее напряжение модуляторов. Более того, частотная дисперсия полимерных структур оказывается существенно меньше кристаллических аналогов и позволяет оптической и радиоволне синфазно распространяться на внушительные расстояния, обеспечивая высокую эффективность преобразования на сверхвысоких модулирующих частотах [1,2].

В работе представлены результаты исследований дисперсии и температурной стабильности нелинейно-оптического отклика оригинальных хромофорсодержащих полиимидов с ковалентно присоединенными хромофорами DR1 и DR13. Указанные исследования проводились методом генерации второй гармоники с накачкой параметрическим генератором света “Solar” в диапазоне фундаментальных длин волн 800-1450 нм. Температурная стабильность электрооптических параметров исследовалась в диапазоне температур от -195 до 200°C.

Максимальные величины нелинейно-оптического отклика составили 80-120 пм/В. Показано, что нелинейный отклик остается стабильным при температурах до 120 °С.

Экспериментально продемонстрированы модуляционные свойства электрооптических устройств, созданных на основе исследованных материалов.

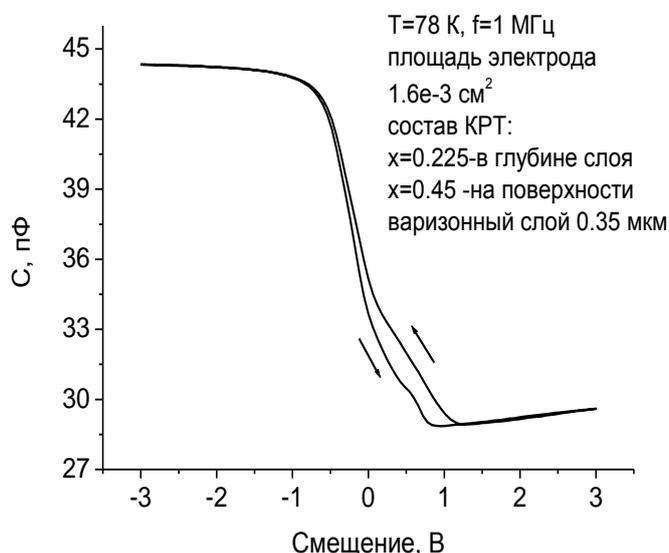
### Литература

- [1] Larry R. Dalton, William H. Steier, Bruce H. Robinson et. al., J. Mater. Chem., 1999, 9, 1905-1920.
- [2] Larry R. Dalton, Philip A. Sullivan, and Denise H. Bale, Chem. Rev., 2010, 110, 25–55.

## Плазмохимический оксинитрид в реакторе с плазмой индукционного типа для пассивации гетероэпитаксиальных структур КРТ выращенных методом МЛЭ

И.О. Парм, А.В. Предеин, В.С. Варавин, В.В. Васильев  
Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова  
тел: (383) 333-1082, эл. почта: vas@isp.nsc.ru

Отработаны режимы синтеза пленок оксинитрида кремния в реакторе индукционного типа на установке Plasmalab System 100 фирмы Oxford Instruments с целью пассивации диод-



На рисунке показана ВФХ снятая на частоте 1МГц при 78К для образца ГЭС КРТ МЛЭ (x=0.225) с синтезированным на нем слоем оксинитрида кремния при температуре 100<sup>0</sup>С, толщина диэлектрика 95.5 нм, показатель преломления 1.668 на длине волны 632,8 нм. Материал металлического электрода- индий.

ных структур на основе гетероэпитаксиального КРТ выращенного методом молекулярнолучевой эпитаксии (ГЭС КРТ МЛЭ), а именно вакансионнолегированного материала КРТ x=0.225 с варизонным слоем на поверхности. Главное внимание было уделено подбору допустимых режимов ионного воздействия на образец КРТ. Ионное воздействие на поверхность КРТ приводит к неконтролируемому увеличению донорных центров в материале, которое связывают с быстро диффундирующей междоузельной ртутью, образующейся в поверхностной зоне в результате ионного удара по поверхности. Изучалось влияние температуры и наведенного плазмой потенциала на электрофизические параметры. Проводились измерения Холловской подвижности и концентрации. Снимались вольт-фарад-ные характеристики(ВФХ).

Концентрация основных носителей заряда  $p = 1.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и подвижность 455  $\text{см}^2/\text{Вс}$  не изменились после нанесения диэлектрика. Напряжение плоских зон равно -0.6 В, что соответствует фиксированному положительному заряду в диэлектрике  $2.2 \cdot 10^8 \text{ Кл/см}^2$  (без учета разницы работы выхода индий-КРТ). При повышении температуры синтеза до 120<sup>0</sup>С наблюдается сдвиг напряжения плоских зон до -0.75В. Гистерезис 200-300 мВ можно объяснить величиной захватываемого в диэлектрик отрицательного заряда  $(7 \div 10) \cdot 10^7 \text{ Кл/см}^2$ .

Таким образом показано, что пленки плазмохимического оксинитрида кремния синтезированные в реакторе индукционного типа могут быть использованы для пассивации ГЭС КРТ МЛЭ.

# Численное исследование полимерного электрооптического модулятора на микрополосковой линии

Р. М. Тазиев<sup>1</sup>, И. В. Юнусов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> ЗАО «НПФ «Микран», Томск, 634041, пр. Кирова д. 51Д  
тел: (383) 330-6578, факс: (383) 333-2771, эл. почта: [taziev@isp.nsc.ru](mailto:taziev@isp.nsc.ru)

В последние годы полимерные электрооптические (ЭО) модуляторы стали популярны благодаря ряду их преимуществ перед модуляторами на кристаллах, традиционных оптических материалах. Эти преимущества заключаются в слабой дисперсии на частотах инфракрасного и миллиметрового диапазона, позволяющая почти идеально согласовать скорости оптической и радиочастотной волн, очень большого ЭО коэффициента и возможности гибкой интеграции с электронными схемами [1]. Как и для относительно нового материала волновода, мало известно деталей устройства по проектированию была проведена для ЭО полимерной модулятора. Основные параметры конструкции волново-

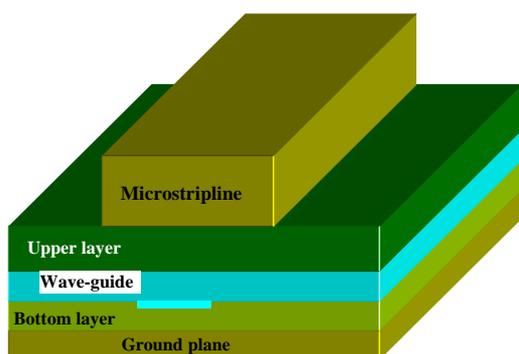


Fig.1. Geometry of the polymer modulator structure.

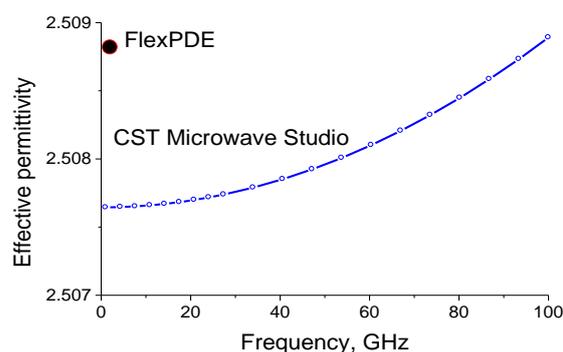


Fig.2. Effective permittivity computed by CST Microwave Studio and FlexPDE softwares.

да: ширина и высота гребня волновода, толщина основного волновода, верхний и нижний слой-обкладки полимерного ЭО модулятора исследовались с целью получения оптимальных характеристик модулятора, его импеданса и эффективной диэлектрической постоянной структуры. Решалась задача нахождения электрических полей для квази-ТЕМ моды, распространяющейся в волноводе, в электростатическом приближении с помощью FlexPDE6 так и, точное решение задачи волновым пакетом CST Microwave Studio Suite. Показано, что значения эффективной диэлектрической постоянной и импеданса, полученные обеими методами, очень хорошо согласуются между собой.

Работа поддержана грантом РФФИ, Грант No 14-29-08120.

## Литература

[1] GigOptix Inc.; [www.GigOptix.comS](http://www.GigOptix.comS) (2009).

# Узкополосные спектральные фильтры на основе нитяных дифракционных решеток и фотонных структур

М.Ю. Барабаненков<sup>1,2</sup>, А.Г. Итальянцев<sup>2</sup>

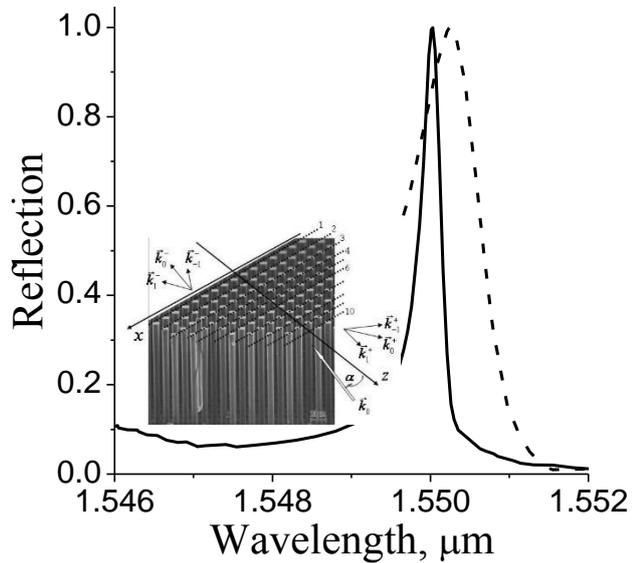
<sup>1</sup> ИПТМ РАН, Черноголовка, 142432, ул. Академика Осипьяна, 6

тел: (496)5244062, факс: (496)5244225, эл. почта: barab@iptm.ru

<sup>2</sup> ОАО "НИИМЭ и Микрон", Москва, Зеленоград, 124460, 1й Западный пр, д. 12/1

Фильтрация излучения является неотъемлемой частью экспериментальной оптики, спектроскопии, радиофотоники. В данной работе представлены результаты расчетов спектров фильтров, составленных из тонких нитей, образующих квадратную решетку

(рис.1 вставка) с малым объемным фактором  $\eta = \pi(R/\Lambda)^2 \ll 1$ , где  $R$  – радиус нити,  $\Lambda$  – период решетки. Рабочий диапазон такого рода дифракционных решеток и фотонных кристаллов (ФК) определяется материалом нитей (нити Ge, Si в т.ч. металлизированные Ag, нити  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ), их диаметром и периодом упаковки. Расчеты частотных спектров прохождения и отражения по мощности нитяных ФК проведены на основе матричного уравнения Риккати [1] в широком спектральном интервале от волн ближнего ИК диапазона (рис.1) до миллиметровых волн. В частности, показано, что (1) один ряд нитей Si в воздухе способен осуществить узкополосную (5-10 нм) фильтрацию в режиме отражения на длине волны 1.55 мкм (рис.1); (2) система нитей Ge и Si проявляет свойства ФК при объемном факторе вплоть до 0.4% и широком диапазоне угла падения волны ( $\pm 50^\circ$ ); (3) ФК из 1 мкм стержней Si ( $\Lambda = 3$  мкм) имеет в спектре прозрачности (3-16 мкм) две зоны блеска (отражения) в диапазонах 4.5 – 5.5 и 7 – 9 мкм; (4) ФК из 10 мкм стержней Si ( $\Lambda = 20$  мкм) имеет в спектре прозрачности зону блеска около 100 мкм; металлизация стержней 0.1 мкм слоем Ag придает структуре свойства эффективного зеркала (99%) для TE волн с длиной волны от 50 мкм; (5) ФК из четырех рядов Si стержней (диаметр 1 мкм, период 3 мкм) являются эффективным TE зеркалом (отражение не менее 99%) для длин волн от 6.5 и 5.5 мкм при толщине слоя Ag 0.1 и 0.2 мкм, соответственно; (6) система кварцевых нитей микронного диаметра является эффективным зеркалом (отражение более 99%) в ближнем ТГц диапазоне (25 – 30 мкм, TE поляризация);



Теоретический спектр отражения TE излучения от одного ряда Si нитей ( $2R = 0.8947$  мкм,  $\Lambda = 1.49$  (сплошная линия) и 1.45 мкм (пунктир)).

$$\mathcal{E}(Si) = (3.45)^2, \quad \mathcal{I}\mathcal{E} = 0.$$

## Литература

[1] Ю.Н.Барабаненков, М.Ю.Барабаненков, ЖЭТФ, **123**, 763 (2003).

## Магнитный отклик кластера немагнитных наночастиц при рассеянии электромагнитного излучения

М.Ю. Барабаненков<sup>1,2</sup>, А.Г. Итальянцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИПТМ РАН, Черногоровка, 142432, ул. Академика Осипьяна, 6  
тел: (496)5244062, факс: (496)5244225, эл. почта: barab@iptm.ru

<sup>2</sup> ОАО "НИИМЭ и Микрон", Москва, Зеленоград, 124460, 1й Западный пр, д. 12/1

Оптические явления, возникающие при рассеянии электромагнитного (ЭМ) излучения в дискретных средах, являются давним предметом исследования. Так, в 1980-1990-х годах предпринимались интенсивные попытки обнаружения явления слабой локализации света в суспензии субмикронных частиц диэлектрика, металлов, полупроводников и системы пор в матрице. В ходе исследований был обнаружен ряд эффектов, появляющихся при условии, что частицы случайной среды являются резонансными (резонансное рассеяние Ми) для падающего излучения (режим оптической индуктивности, возникающий вследствие захвата энергии ЭМ поля резонансными частицами с последующим высвечиванием; уменьшение скорости переноса энергии ЭМ поля). Свойства резонансных дискретных сред вызвали в 2000-х годах существенный интерес в связи с попытками конструирования искусственных оптических т.н. метаматериалов.

В настоящее время метаматериалы на основе ансамблей наночастиц разрабатываются для нужд радиоэлектроники и радиофотоники. Это, например, микроволноводы с высокодобротными резонаторами в фотонных кристаллах [1] или же низкоразмерные структуры из диэлектрических наночастиц, поддерживающие высокодобротные оптические моды [2].

В данном докладе рассматривается динамическое свойство кластера немагнитных проводящих частиц, состоящее в появлении у кластера эффективного диамагнетизма, наведенного внешним ЭМ излучением.

Показано, что физическая природа эффективного диамагнетизма обусловлена различным вкладом электрического и магнитного дипольных моментов, индуцированных в частице при рассеянии на ней волны, в поперечную и продольную компоненты (относительно волнового вектора) эффективной диэлектрической проницаемости среды, т.е. кластера с пространственной дисперсией его эффективной диэлектрической проницаемости, через разность которых вводится эффективная магнитная проницаемость кластера частиц [3].

В приближении независимых малых сферических частиц проведено численное исследование частотной зависимости эффективной магнитной проницаемости сред, состоящих из частиц кремния или золота в видимом и терагерцовом диапазонах длин волн, соответственно. Найден резонансный диапазон частот, в котором вещественная часть эффективной магнитной проницаемости среды может принимать нулевое и отрицательные значения. При этом, в частности, радиус частиц кремния составляет 100 нм и менее с параметром упаковки частиц в пространстве, порядка 0.2. С физической точки зрения найденный диапазон параметров характеризуется тем, что внутри частицы возбуждается одна и только одна мода Ми магнитного рассеяния.

### Литература

- [1] .Yu. Xu, Y.L.Reginald, K.Lee, A.Yariv, Phys.Rev.E **62**, 7389 (2000).
- [2] A.L.Burin, Phys.Rev.E, **73**,066614(2006).
- [3] J. Lindhard, S. Dan. Mat. Fys. Medd., **28**, 3-57 (1954).

## Исследование зеленой полосы в спектрах фотолюминесценции сильно легированных слоев AlGa<sub>x</sub>N:Si с молярной долей Al выше 0.5

И.В. Осинных<sup>1,2</sup>, Т.В. Малин<sup>1</sup>, В.Ф. Плюснин<sup>2,3</sup>, К.С. Журавлев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им А.В. Ржанова, пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия.

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия.

<sup>3</sup>Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского, ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия.

тел: +7(383)333-44-75, факс: + 7(383)333-27-71, эл.почта: igor-osinnykh@isp.nsc.ru

Создание мощных эффективных и долгоживущих твердотельных источников лазерного излучения сине-зеленого диапазона спектра является важной задачей. Недавно было сообщено об обнаружении зеленой люминесценции при оптических переходах через уровни дефектов в слоях AlGa<sub>x</sub>N, сильно легированных донорами [1]. Это явление создает предпосылки для разработки эффективных источников света сине-зеленого диапазона спектра и сверхбыстрых лазеров. Целью данной работы было исследование центров, ответственных за появление зеленой полосы методом фотолюминесцентной (ФЛ) спектроскопии.

В работе исследовались слои Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии из аммиака. Содержание Al в слоях составляло 0.62 и 0.7, легирование осуществлялось SiH<sub>4</sub>, концентрация атомов Si в слоях достигала  $5 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Измерения спектров возбуждения ФЛ проводились с использованием спектрофлуориметра FLS920 с 450-ваттной ксеноновой лампой в качестве источника возбуждающего излучения при комнатной температуре. Возбуждение нестационарной ФЛ осуществлялось лазерным диодом с энергией фотонов 4.43 эВ и длительностью импульсов 600 пс. Кривые затухания ФЛ измерялись с использованием время-коррелированного счета фотонов. Стационарная ФЛ при температурах 5-750 К возбуждалась He-Cd лазером (энергия фотонов 3.81 эВ, мощность лазера 10 мВт).

В спектрах возбуждения ФЛ наблюдалась полоса с максимумом при 4.96 и 5.06 эВ для слоев состава 0.62 и 0.7 соответственно и шириной 0.45 эВ. В спектрах ФЛ им соответствовала зеленая полоса (ЗП) ФЛ с максимумом около 2.32 и 2.34 эВ для слоев состава 0.62 и 0.7 соответственно и шириной 0.54 эВ. Таким образом центр рекомбинации характеризуется большим Стоксовым сдвигом, что обусловлено сильным электрон-решеточным взаимодействием. Понижение мощности возбуждения на порядок приводила к сдвигу в сторону низких энергий на 0.01 эВ и уширению полосы на 0.01 эВ, что свидетельствует о донорно-акцепторном механизме ЗП. При повышении температуры с 5 до 750 К положение максимума ЗП линейно сдвигалось в сторону высоких энергий на 0.11 эВ, а ширина увеличивалась с 0.49 до 0.57 эВ. Температурная зависимость интенсивности ЗП была нелинейной и необычной: от 5 до 270 К интенсивность вырастала на величину порядка 70%, при дальнейшем росте температуры интенсивность падала на 30 %.

### Литература

[1] P. A. Bokhan, P. P. Gugin, Dm. E. Zakrevsky, K. S. Zhuravlev, T. V. Malin, I. V. Osinnykh, V. I. Solomonov, and A. V. Spirina, J. Appl. Phys., **116**, 113103 (2014).

## Кинетика релаксации полупроводниковых наноструктур $A_3B_5$ , предназначенных для пассивной синхронизации мод лазеров

Г.М. Борисов<sup>1,2</sup>, В.Г. Гольдорт<sup>1</sup>, Д.В. Ледовских<sup>1</sup>, А. А. Ковалёв<sup>1</sup>, М.Н. Путьато<sup>1</sup>,  
В.В. Преображенский<sup>1</sup>, Н.Н. Рубцова<sup>1</sup>, Б. Р. Семягин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
просп. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2,  
Новосибирск, 630090, Россия

тел: (383)333-27-69, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [dvledovskikh@isp.nsc.ru](mailto:dvledovskikh@isp.nsc.ru)

Разработка полупроводниковых лазерных зеркал с насыщающимся поглощением [1] на основе соединений  $A_3B_5$  необходима для обеспечения режима синхронизации мод суб-пикосекундных лазеров в области длин волн излучения 1-3 микрон. Такие оптические элементы должны обладать высоким кристаллическим качеством, механической прочностью в рабочем температурном диапазоне, иметь высокий коэффициент отражения в спектральной области, совпадающей с областью усиления лазера, обеспечивать необходимый уровень насыщаемых потерь и низкий уровень ненасыщаемых оптических потерь. Для лазеров с высокой частотой следования суб-пикосекундных импульсов важна высокая скорость релаксации насыщающегося поглотителя.

Полупроводниковые структуры, включающие квантовые ямы с «толстыми» барьерами и с наноструктурированными барьерами, выращенными на подложке GaAs (001), а также лазерные зеркала с наноструктурированными барьерами исследовались в отражении фемтосекундных импульсов пробного излучения, следующих за более интенсивными импульсами возбуждающего излучения с центральной длиной волны 1040 нм. Метод двойной модуляции с регистрацией пробного излучения на суммарной частоте позволил снизить вклад рассеянного излучения накачки и достигнуть чувствительности по изменению отражения на уровне  $10^{-5}$ .

Кинетика восстановления линейной отражательной способности для зеркала с резонансными квантовыми ямами с наноструктурированными барьерами исследована для интенсивностей накачки, соответствующей плотности  $(0,3-5,8) \cdot 10^{14}$  фотонов/см<sup>2</sup>. Показано, что скорость электронно-дырочной рекомбинации слабо изменяется в этом диапазоне, а скорость ионизации экситонов в квантовых ямах в этом диапазоне уменьшается с ростом интенсивности накачки, в согласии с литературными данными. Характерное время электронно-дырочной рекомбинации оказалось существенно короче, чем в образцах с квантовыми ямами с толстыми барьерами. Аналогичные зеркала показали перспективность их применения в лазере  $Yb^{3+}: KY(WO_4)_2$  [2], а также в лазере  $Yb^{3+}: KGd(WO_4)_2$ . Обсуждаются особенности кинетики полупроводниковых наноструктур на подложке GaAs (001).

### Литература

[1] U. Keller, K.J. Weingarten, F.X. Kärtner, D. Kopf, B. Braun, I.D. Jung, R. Fluck, C. Hönninger, N. Matuschek, J. Aus der Au, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics (JSTQE). 2, 435 (1996).

[2] А.А. Ковалёв, В.В. Преображенский, М.А. Путьато, О.Р. Пчеляков, Н.Н. Рубцова, В.Р. Семягин, В.Е. Кисел', С.В. Курил'чик, Н.В. Кулешов, Laser Phys. Lett., 8, 431 (2011).

## Фотолюминесценция эрбия в Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

К.В. Феклистов<sup>1</sup>, Д.С. Абрамкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр-кт акад. Лавреньева, 13  
тел: (383) 333-2537, факс: (383) 333-2771, эл. почта: kos@isp.nsc.ru.ru

В работе исследована фотолюминесценция атомов эрбия в матрице Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при комнатной температуре.

Эрбий считается перспективным легирующим элементом для создания интегрированных опто-электронных приборов на кремнии. Его оптический переход Er<sup>+3</sup>: <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> на длине волны 1.54 мкм попадает в диапазон наименьших потерь оптоволоконных линий. Начиная с 1983 года с работ Ennen [1] и по настоящее время, несмотря на длительные и обширные исследования [2-4], остается нерешенной ключевая задача эффективного преобразования электрической накачки в излучение.

В литературе рассматривают три основных механизма возбуждения эрбия: прямое поглощения фотона атомом эрбия, рекомбинация электрон-дырочных пар и ударное возбуждение атома эрбия горячими носителями. В первом случае оптическая накачка имеет очень низкое сечение возбуждения эрбия ( $2.7 \times 10^{-20}$  см<sup>2</sup>) [5]. Тем не менее в оптоволоконных лазерах (Er в SiO<sub>2</sub>) она реализуется с невысоким КПД. Во втором случае в кремнии происходит двухступенчатый процесс сначала связывания экситона на центре Er, а затем рекомбинация связанного экситона. На каждом этапе избыточная энергия около 150 мэВ передается в решетку или электронную подсистему. При низких температурах (15К) сечение возбуждения эрбия в кремнии по экситонному механизму составляет  $3 \times 10^{-15}$  см<sup>2</sup>, а внутренняя квантовая эффективность 10% при низких мощностях накачки [6]. С повышением температуры, однако, наблюдается т. н. температурное гашение люминесценции. В литературе оно связывается с т. н. обратным процессом девозбуждения эрбия (back transfer) [3-6] с рождением связанного экситона и его делокализации. В третьем механизме ударного возбуждения горячими электронами сечение возбуждения составляет  $6 \times 10^{-17}$  см<sup>2</sup> в кремнии [7] и  $6 \times 10^{-15}$  см<sup>2</sup> в SiO<sub>2</sub> [8]. Причем эффективность электролюминесценции не падает и при комнатной температуре. Однако, эффективность излучения, достигнутая на настоящее время в полупроводниковых структурах, легированных эрбием — низкая, ниже 0.1%.

В работе предлагается рассмотреть в качестве матрицы - Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Обладая умеренной шириной запрещенной зоны (~4 эВ), Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> может оказаться более удобной средой для возбуждения Er, чем широкозонный SiO<sub>2</sub> и более узкозонный кремний.

### Литература

- [1] H. Ennen et. al., J. Appl. Phys. **61**, 4877 (1987)
- [2] В.Н. Соболев, ФТП **29**, 1153 (1995)
- [3] A. Polman, J. Appl. Phys. **82**, 1 (1997)
- [4] A.J. Kenyon, Semicond. Sci. Technol. **20**, p. R65 (2005)
- [5] N. Hamelin et. al., J. Appl. Phys. **88**, 5381 (2000)
- [6] Priolo F., Franzo G., Coffa S., Carnera A., Phys. Rev. B **57**, 4443 (1998)
- [7] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, Appl. Phys. Lett. **69**, 2077 (1996)
- [8] S. Wang et.al., Appl. Phys. Lett. **71**, 2824 (1997)

## О моделировании естественной ширины линий в полупроводниковых лазерах

М.Г. Ноппе

Новосибирский Государственный Технический университет, 20 К. Маркс, 630092,  
Новосибирск, РФ  
[noppe@ieee.org](mailto:noppe@ieee.org), т.(383)2237948

Предложены физические механизмы для естественной ширины линий в Фабри-Перо (FP) и DFB лазерах. Выведены формулы для формы линии и для естественной ширины линий в размерных и безразмерных формах для FP и DFB лазеров. Были промоделированы все экспериментальные измерения естественной ширины линий в FP и DFB лазерах, представленные в литературе, на основе выведенных формул для формы линии (первый метод) и на основе выведенных формул для естественной ширины линий (второй метод).

1. Измерения естественной ширины линий для полупроводниковых лазеров для Фабри-Перо (FP) и для DFB лазеров показали различные функциональные отличия от формулы Шавлю-Таунса при вычислении естественной ширины линии для одной моды.

Настоящее сообщение посвящено изложению основных результатов созданной феноменологической теории естественной ширины линий для полупроводниковых лазеров (для FP лазеров [1,2,3] и для DFB лазеров [4,5,6]).

2. Основная концепция нашего подхода для полупроводниковых лазеров FP состоит в применении нелинейного показателя преломления на частотах излучения лазера, который приводит к средовой компоненте естественной ширины линий.

Новый компонент естественной ширины линий для DFB лазеров - компонент гофрирования был определен на основе применения предложенного эффективного нелинейного показателя преломления. Кроме того, мы вывели фазовую компоненту и приняли во внимание амплитудную компоненту естественной ширины линий для лазеров FP и для лазеров DFB.

3. Естественная ширина линий в FP и DFB лазерах была рассчитана на основе новой формулы для формы линии и формулы для естественной ширины линий, которые были выведены в процессе применения нелинейного показателя преломления [1,2] в FP лазерах и эффективно нелинейного показателя преломления, который был предложен в [4,6] для DFB лазеров. Мы промоделировали экспериментальные измерения естественной ширины линий в FP (15 экспериментов) [2-3] и в лазерах DFB (15 экспериментов) [4-6] представленные в литературе, на основе выведенных формул формы линии (первый метод) и на основе выведенных формул для естественной ширины линий (второй метод).

### Литература

- [1] M.G. Noppe 2012 NUSOD-2012: Proc. XII Int. Conf. on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (August 2012) pp 123–4
- [2] M.G. Noppe, *Laser Phys.*, 24, 125006 (2014).
- [3] M.G. Noppe In Proc. of XII Intern. Conf. (APEIE – 2014)- 34006 Proceedings, NSTU, Novosibirsk, October 2-4, 2014, (v.1, pp. 472 -477) Novosibirsk, Russia
- [4] M.G. Noppe. In Proc. of XII Intern. Conf. (APEIE – 2014)- 34006 Proceedings, NSTU, Novosibirsk, October 2-4, 2014, (v.1, pp. 456 - 460) Novosibirsk, Russia 456
- [5] M.G. Noppe In Proc. of XII Intern. Conf. (APEIE – 2014)- 34006 Proceedings, NSTU, Novosibirsk, October 2-4, 2014, (v.1, pp. 461 -467) Novosibirsk, Russia 461
- [6] M.G. Noppe, *The Open Optics Journal* (в печати).

# Стимулированное излучение и вертикально излучающие лазеры на двойных гетероструктурах кадмий-ртуть теллур с оптической накачкой на длине волны около 1 микрона

А.А. Андронов, Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков<sup>1</sup>; Д.Е. Святошенко, А.В. Маругин<sup>2</sup>, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> ИФМ РАН, Н.Новгород, 603950, ул.Академическая 7

<sup>2</sup> ННГУ, Н.Новгород, 603950, просп. Гагарина 23

<sup>3</sup> ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, ул. Академика Лаврентьева 13

Тел. (831) 417-94-73. ФАКС (831) 417-94-73, эл. почта: andron@ipmras.ru

В докладе обсуждается фотолюминесценция и стимулированное излучения из двойных классических гетероструктур системы кадмий-ртуть-теллур на длинах волн 1.5- 2.5 мкм при 78К и 300К (Рис 1) и 3.0 – 5.0 мкм при 78К из «кусочков» произвольно сколотых пластин

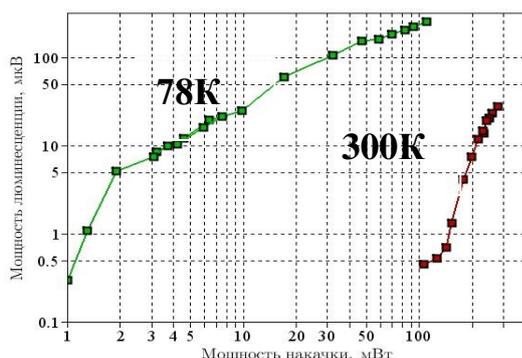


Рис. 1. Максимумы излучения от накачки для из образца КРТ. Длина волны излучения: 2.186 мкм.

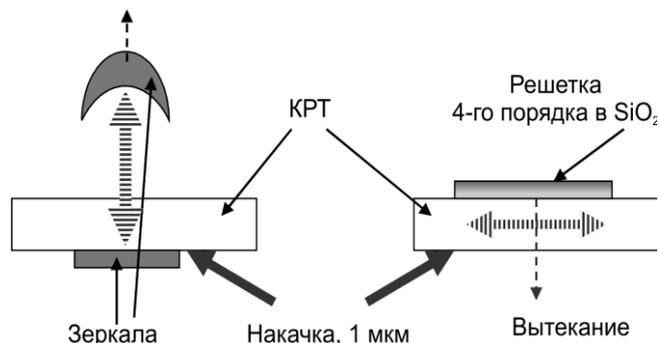


Рис. 2.

при накачке твердотельными и диодными лазерами [1]. Приводятся результаты по разработке и изготовлению лазеров на таких гетероструктурах с вертикальным выводом излучения. Такой вывод излучения основывается или на вертикальных резонаторах с многослойными зеркалами и внешним резонатором, или на брегговских решетках высокого порядка (ср. [2]), с гармониками решетки, которые определяют вертикальный вывод за счет вытекания моды, распространяющейся вдоль гетероструктуры (Рис2). Изготовлены вертикальные резонаторы на КРТ структурах. Рассчитаны и заказаны брегговские решетки 3-порядка в слое SiO<sub>2</sub> на поверхности КРТ гетероструктуры. Мы предполагаем, что ко времени конференции будут продемонстрированы подобные лазеры на длинах волн около 2 микрон. Работа поддержана Грантом РФФИ офи-м 13-02-12100.

## Литература

- [1] Ю.Н. Ноздрин, В.С. Варавин и др., Письма в ЖЭТФ, 2013, том 97, в. 6, стр. 404 –408.  
 [2] В.В.Васильева, Д.А.Винокуров и др., ФТП, , 2012, т.46,в.2, стр. 252-257.

## Вклад фотоэлектронных явлений в р-GaAs (Cs,O) – фотокатоде и в промежутке фотокатод – МКП в частотно-контрастную характеристику планарного ЭОП

Д.В. Горшков<sup>1,2</sup>, Н.И. Беспалко<sup>3</sup>, Д.В. Горшков<sup>3</sup>, М.В. Лобкин<sup>3</sup>, С.А. Кесаев<sup>3</sup>,  
С.Н. Косолюбов<sup>1</sup>, С.А. Рожков<sup>1,2</sup>, Г.Э. Шайблер<sup>1</sup>, А.С. Терехов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИФП СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия.

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия.

<sup>3</sup>ОАО "Катод", ул. Падунская, 3, Новосибирск, 630047, Россия.

тел: (383)330-98-74, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [GorshkovDV@isp.nsc.ru](mailto:GorshkovDV@isp.nsc.ru)

Известно, что частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) планарного электронно-оптического преобразователя (ЭОП) зависит от латеральной «диффузии» электронов и фотонов в активном слое фотокатода (ФК), от «поперечного» расширения электронного пучка в промежутке ФК – микроканальная пластина (МКП) из-за распределения эмитированных фотоэлектронов по «поперечным» энергиям ( $n_e(\epsilon_{tr})$ ), а также от обратного рассеяния фотоэлектронов входной поверхностью МКП (эффект «ореола»). Тем не менее, вклады каждого из перечисленных выше факторов в ЧКХ ФК и промежутка ФК – МКП до сих пор не изучены. В данной работе проведены исследования, позволившие создать количественную модель для расчёта ЧКХ р – GaAs(Cs,O) – фотокатода и промежутка ФК – МКП в зависимости от свойств ФК, МКП и величины (d) вакуумного промежутка ФК – МКП. Измерение латеральной «диффузии» электронов и фотонов в активном слое фотокатода проводилось методом фотолюминесценция с высоким пространственным разрешением. Для теоретического описания латеральной «диффузии» электронов и фотонов в активном слое фотокатода использовался метод Монте-Карло. Сравнение результатов расчётов и экспериментов показало необходимость учёта «фотонного переноса» в латеральной диффузии фотоэлектронов. Вычисление «поперечного» расширения электронного пучка в промежутке ФК – МКП возможно тогда, когда известна  $n_e(\epsilon_{tr})$ . Для измерения  $n_e(\epsilon_{tr})$  была разработана методика, основанная на анализе расширения пучка электронов, движущихся в промежутке ФК - МКП, в однородном электрическом поле при ускоряющих напряжениях 100 – 800 В. Для проведения таких измерений были изготовлены тестовые ЭОП с р – GaAs(Cs,O) – фотокатодами и МКП без ионно-барьерной пленки. Для повышения точности измерения  $n_e(\epsilon_{tr})$  величины d в тестовых ЭОП были увеличены до 1 – 3 мм. Измерения d проводилось в готовых ЭОП с помощью цифрового микроскопа с погрешностью, не превышающей 2 мкм. Квантовые эффективности фотокатодов (QE) в ЭОП при  $\hbar\omega = 1.9$  эВ находились в интервале 0.25 - 0.30. Для изучения связи между  $n_e(\epsilon_{tr})$  и QE, в некоторых ЭОП величина квантовой эффективности специально уменьшалась путём десорбции цезия из (Cs,O) – слоя прогревом ЭОП при повышенных температурах. Измерения  $n_e(\epsilon_{tr})$  проводились на стенде, позволяющим формировать на ФК световое пятно с полушириной  $\sim 2$  мкм и измерять форму светового пятна на экране ЭОП в динамическом диапазоне, превышающем  $10^4$ . Обработка полученных данных позволила определить ЧКХ «первого промежутка» ЭОП и разделить вклады каждого из анализируемых факторов в эту характеристику. Установлено, что увеличение QE, связанное с увеличением эффективного отрицательного электронного сродства, «расширяет»  $n_e(\epsilon_{tr})$  и, как следствие, ухудшает ЧКХ ЭОП. Взаимосвязь между QE и ЧКХ необходимо учитывать при оптимизации интегрального параметра качества ЭОП.

## 3D фотоматрица видимого диапазона для регистрации быстрых процессов

Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов, В.В. Васильев  
ООО "РТК Инпекс", 141013, Мытищи, Силикатная ул., 39Д,  
*rtcinpex@mail.ru*

Разработан и передан в производство тестовый матричный КМОП фотоприёмник формата 128×64 ячейки 40×40 мкм, позволяющий быстро (с минимальным интервалом в 30 - 100 нс) проводить запись последовательности из 8 кадров с последующим выводом с кадровой частотой 1 кГц. Тем самым, при наличии синхронной подсветке, наряду с двухмерной картинкой, возможно получение 3D изображений. Параметры приемника приведены в таблице.

<i>Наименование параметра, единица измерения</i>	<i>не менее</i>
Напряжение насыщения, В	1,0
Интегральная чувствительность, В/(лк·с)	25
Филл-фактор, %	18
Коэффициент преобразования, мкВ/электрон	8
Зарядовая емкость, тысяч электронов	800
Количество аналоговых выходов, шт	1

Из возможных способов организации работы скоростных фотоматриц [1] был выбран вариант с аналоговым методом хранения данных в пикселе. Длительность накопления и время между кадрами может регулироваться. Основным режимом является "накопление с нарастающим итогом", когда во время накопления каждого кадра входит время накопления предыдущих кадров. Возможен также режим, когда каждый кадр независим.

В докладе будут представлены результаты измерений образцов.

### *Литература*

[1] Майоров В.П. Семин М.С. Обзор материалов по скоростным матрицам. ЗАО "НПК Видеоскан", Москва, 2015 г.

## **КМОП мультиплексоры форматов 6×576, 3×4×576, 64×64, 1×64 для гибридных ИК ФПУ**

**Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов, В.В. Васильев**  
ООО "РТК Инпекс", 141013, Мытищи, Силикатная ул., 39Д,  
*rtcinpex@mail.ru*

Разработаны, изготовлены и исследованы КМОП мультиплексоры для гибридных, в том числе выполненных с использованием технологии перевернутого монтажа на индиевых микроотбиках, ИК ФПУ.

1. Мультиплексор 6×576 с ВЗН по шести фотодиодам типа "n на p-подложке". Емкость интегрирования 0,5 или 1,5 пФ (на диод). Двухнаправленное сканирование. Деселекция дефектных элементов с коррекцией коэффициента передачи. Шаг расположения фотодиодов вдоль/поперёк направления сканирования 42/14 мкм.

2. Мультиплексор 3×4×576 для накопления и вывода сигналов с трех четырёхрядных линеек длиной 576 фотодиодов типа "n на p-подложке", каждая из которых может работать в своем спектральном диапазоне. Основной режим работы - вывод во время интегрирования. Время накопления и емкости интегрирования (из диапазона 0,25 - 4 пФ, 16 вариантов) выбираются для каждой линейки индивидуально. Шаг фотодиодов в линейках 28 мкм.

3. Мультиплексор 64×64 ячеек 40×40 мкм для приемников типа "p на n-подложке". Емкость интегрирования 2 пФ. Максимальная кадровая частота >2 кГц. Минимальное количество электрических выводов из холодной зоны 8 шт. Размер кристалла 3,9 × 3,5 мм. Режим работы - вывод во время интегрирования.

4. Тестовый мультиплексор 64 канала с шагом 70 мкм для резистивных КРТ приемников с расширенной красной границей. Такие приемники обладают малым сопротивлением (~0,2 кΩ) и шумом (~10 нВ Гц<sup>-1/2</sup>). Для реализации отношения сигнал/шум приемников в ФПУ, нужны схемы считывания с чрезвычайно малым собственным шумом и стандартные решения интегрирования фототока или мостовые схемы не подходят. Предложена и реализована схема с суммированием выборок (до 32 выборок), причем выборки могут суммироваться как параллельно (сигнал сохраняется, а шум уменьшается в  $\sqrt{32}$  раз), так и последовательно (сигнал увеличивается в 32 раза, шум увеличивается в  $\sqrt{32}$  раз), что облегчает требования к выходным каскадам схемы. Размер кристалла 4,7×3 мм.

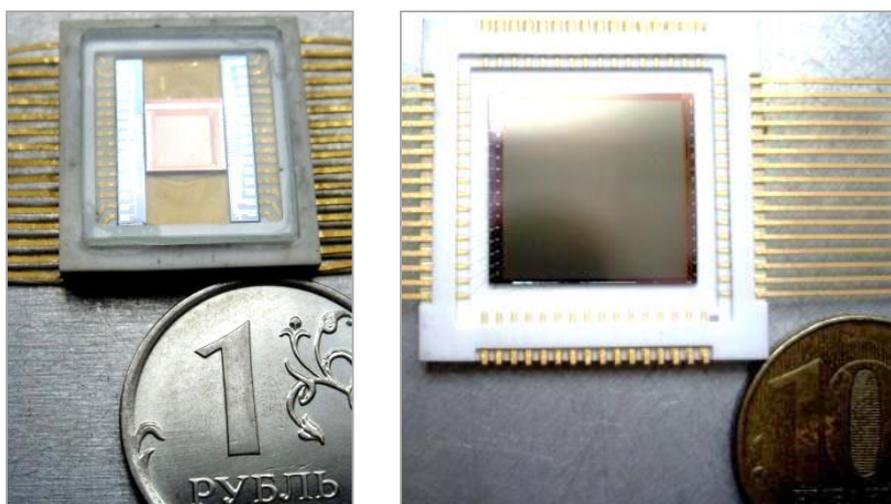
## Отечественные КМОП фотоприемники 4/3" и 1/3"

Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов, Т.И. Анисимова, Д.С. Ельников, Е.В. Костюков,  
А.М. Маклаков, В.Ю. Ноженко, А.А. Пугачёв, Н.И. Рощина,  
А.С. Скрылёв, С.В. Трунов, Ю.М. Череменский  
ОАО "НПП "Пульсар", Москва, Окружной проезд 27.

Разработаны, изготовлены и испытаны КМОП фотоприёмники форматов 1024×1024 и 256×256 ячеек 15×15 мкм в металлокерамическом корпусе с входным оптическим окном. Фотоприемники обеспечивают преобразование оптического излучения в электрический сигнал, предварительную обработку, коммутацию, усиление и прогрессивную развертку на 1, 4, 8 или 16 аналоговых выходов в режимах Rolling, IWR, ITR с функциями "окно интереса" (до 4 окон), неразрушающее считывание, ДКВ, переворота изображений с управлением через SPI порт.

Параметр		Км	Унас	$\delta U_T$	$\delta U_C$	Su
Ед. измерения		%	В	%	%	В·лк <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>
ТЗ		$\geq 60$	$\geq 0,5$	$\pm 8$	$\pm 15$	$\geq 2,0$
КМОП 250	Сред. Знач.	65.29	0.79	4.38	8.29	2.85
	Ср.Кв. Откл.	4.80	0.03	0.80	1.36	0.43
КМОП 1000	Сред. Знач.	66.25	1.14	5.68	12.13	5.70
	Ср.Кв. Откл.	4.79	0.05	1.53	1.65	1.22

В таблице приведены результаты измерений основных параметров. Для измерений использовался стенд разработки и изготовления ФГУП "ОКТЬ "Омега".



На фотографиях показаны фотоприемники 256×256 (слева) и 1024×1024.

## **Отечественный КМОП фотоприемник 4/3", 1Мп при малых временах интегрирования и при больших освещенностях**

**Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов**  
ОАО "НПП "Пульсар", Москва, Окружной проезд 27.

В конце 2014 г. ОАО "НПП "Пульсар" успешно завершило работу по созданию КМОП фотоприемников видимого диапазона формата 1024×1024 ячеек 15×15 мкм [1]. Дополнительные исследования приборов при малых временах интегрирования, а также при больших освещенностях (что не было предусмотрено исходным техническим заданием) позволят определить возможности приборов при регистрации быстрых процессов, а также допустимые локальные пересветки, не мешающие восприятию остальных элементов сцены.

В докладе приведены осциллограммы выходного сигнала при локальной засветке пятном диаметром ~1мм при временах накопления от 0,5 мкс до 60 мс и освещенностях до примерно 100 тыс. люкс.

Полученные результаты говорят о пригодности фотоприемника для регистрации процессов с характерным временем до по крайней мере 0,5 мкс. Также фактически показана возможность регулирования времени экспозиции не менее чем на 5 порядков от 0,5 мкс до времени кадра.

Показано, что локальные экспозиции, не менее чем в 300 раз превышающие экспозицию насыщения, не приводят к заметному "расплыванию" сигнала (характерному для ПЗС приемников) на соседние затенённые ячейки.

### ***Литература***

1. Бородин Д.В., Осипов Ю.В., Анисимова Т.И. и др. КМОП МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА. Материалы XIII НТК "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА", М.: ОАО "НПП "Пульсар", 2014 г., С.141.

# Кремниевые мультиплексоры фотосигналов инфракрасных фотоприемников для гражданских применений

М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, А.И. Козлов, В.Н. Овсяк

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН),

Новосибирск, 630090, пр-т Акад. Лаврентьева, 13

тел: (383)333-19-54, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [kozlov@isp.nsc.ru](mailto:kozlov@isp.nsc.ru)

Исследованы научно-технические принципы создания унифицированной серии кремниевых мультиплексоров (КМ), предназначенных для считывания и предварительной обработки фотосигналов в составе многоэлементных инфракрасных фотоприемников (ИК ФП). Рассмотрены линейчатые (1×64, 1×128, 1×288, 1×576) и матричные (32×32, 64×64, 128×128, 320×256) КМ, разработанные на базе как экспериментальной, так и промышленной технологии (рис.1-2) [1, 2].



Рис.1. Типовые кристаллы мультиплексоров, разработанные в ИФП СО РАН для создания ИК ФП.

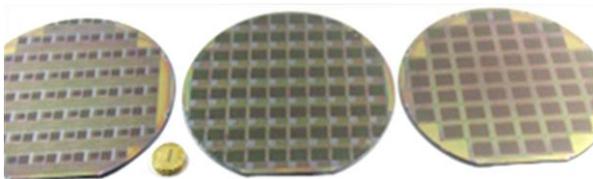


Рис.2. Пластины с КМ; производство ОАО "Ангстрем".



а) б) в)

Рис.3. ИК изображения, полученные на основе: а) КРТ диодов с  $\lambda_{max} \approx 11$  мкм, б) КРТ диодов с  $\lambda_{max} \approx 5$  мкм, в) МСКЯ с  $\lambda_{max} = 9,5$  мкм.

Таблица

Формат	Шаг, $\mu\text{m}$	Тип ФД	$\lambda_{max}$ , $\mu\text{m}$	NETD, мК
128×128	50	МСКЯ	8.3	22
		КРТ фото-диоды	6	17
~5	25			
~11	20			
1×576	30		10.2	14

Проанализированы особенности организации, создания и применения КМ с поэлементным, построчным и кадровым накоплением фотосигналов многоэлементных ИК ФП, выполненных на различных полупроводниковых материалах [1, 3]. Для специальных применений преимущественно используется кадровый режим накопления фотосигналов. Для гражданских применений широко используется и построчное накопление, которое позволяет получать лучшее температурное разрешение тепловизионных приборов, особенно в длинноволновом ИК спектральном диапазоне [1].

Изготовленные КМ обеспечивают создание ИК ФП для спектральных диапазонов 8-14 и 3-5 мкм с температурным разрешением, соответствующим и превышающим уровень мировых образцов (см. табл., рис.3), и могут быть предложены для включения в создаваемую единую информационную базу научно-технических разработок МО РФ, предлагаемых для гражданской промышленности [1-3].

## Литература

- [1] А.И.Козлов, И.В.Марчишин, В.Н.Овсяк, А.Л.Асеев. Оптический журнал. 2008. **75**, №3. с.60-67.
- [2] А.И.Козлов, И.В.Марчишин. Автометрия. 2012. **48**, №4. с.60-72.
- [3] А.И.Козлов. Оптический журнал. 2010. **77**, №7. с.19-29.

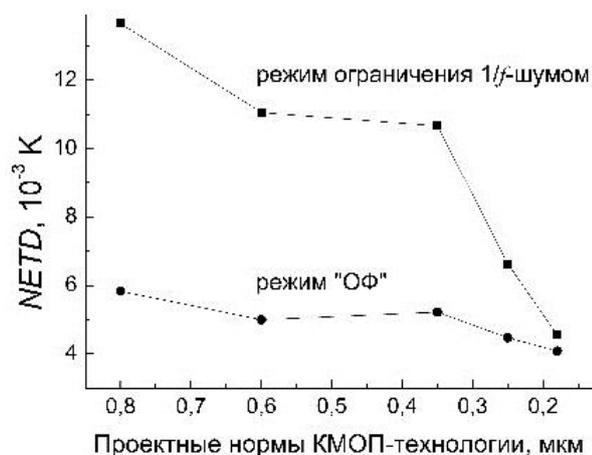
## Влияние параметров кремниевой схемы считывания фотосигналов и матрицы детекторов инфракрасного диапазона на характеристики фотоприемников

М.А. Демьяненко, А.И. Козлов, В.Н. Овсяк

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН),  
Новосибирск, 630090, пр-т Акад. Лаврентьева, 13  
тел: (383)333-19-54, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [kozlov@isp.nsc.ru](mailto:kozlov@isp.nsc.ru)

Рассмотрены особенности построения интегральных схем считывания фотосигналов (кремниевых мультиплексоров) и многоэлементных инфракрасных фотоприемников (ИК ФП) на их основе. Проведена оценка эквивалентной шуму разности температур (*NETD*) ИК ФП для мультиплексоров с кадровым или с построчным накоплением фотосигналов детекторов на основе соединения кадмий - ртуть - теллур и многослойных структур с квантовыми ямами [1, 2].

При построении ИК ФП обычно требуется обеспечить режим "ограничения фоном" ("ОФ"), когда параметры определяются шумом фонового излучения. В этом случае несложно получить выражение, описывающее зависимость температурного разрешения ИК ФП от параметров выбранной кремниевой технологии:  $NETD \sim (TOX/EP)^{1/2}$ , где EP - напряжение питания, TOX - толщина рабочего диэлектрика в интегральной схеме считывания фотосигналов.



В некоторых случаях обеспечить режим "ОФ" оказывается затруднительно, например, из-за больших затрат энергии на охлаждение ИК ФП до требуемой температуры. Температурное разрешение в этом случае определяется 1/f-шумом входного транзистора в ячейке мультиплексора. При этом аналитическая зависимость оценки эквивалентной шуму разности температур от технологических параметров несколько упрощается:  $NETD \sim (TOX)^{1/2}$  для входного p-МОП транзистора или  $NETD \sim TOX$  для входного n-МОП транзистора.

Аналитические оценки NETD с использованием полученных выражений представлены на рис. Кроме того, исследованы зависимости NETD для ИК ФП на основе разных мультиплексоров от параметра  $R0A$ , характеризующего уровень технологии детекторов, размера ячейки матрицы, квантовой эффективности, длины волны максимума спектральной чувствительности детектора, емкости накопления мультиплексора и проектных норм КМОП технологии изготовления схем считывания фотосигналов [1, 2].

На основе проведенных исследований в ИФП СО РАН создаются мультиплексоры, обеспечивающие изготовление ИК ФП для спектральных диапазонов 8-14 и 3-5 мкм с температурным разрешением на уровне мировых образцов.

### Литература

- [1] В.В. Васильев, А.И. Козлов, И.В. Марчишин, Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев. Оптический журнал. 2014. **81**, №7. с.39-45.
- [2] М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, А.И. Козлов, И.В. Марчишин, В.Н. Овсяк. Автометрия. 2015. **51**, №2. с.110-118.

## Характеризация элементов матричного фотоприёмника на основе гетероструктур InP/InGaAs

И.Б. Чистохин<sup>1</sup>, Н.А. Валишева<sup>1</sup>, В.В. Преображенский<sup>1</sup>, А.С. Скрылёв<sup>2</sup>,  
В.В. Чернокожин<sup>2</sup>, М.М. Крымко<sup>2</sup>, Ю.В. Брашеван<sup>2</sup>, Ю.И. Завадский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13

<sup>2</sup> ОАО «НПП «Пульсар», г. Москва, 105187, Окружной пр-д, 27

тел: (383) 330-1967, факс: (383) 333-3502, эл. почта: igor@isp.nsc.ru

В ОАО «НПП «Пульсар» разработана конструкция матричного фотоприёмника формата 128×128 с шагом 88 мкм по горизонтали и вертикали на базе гетероструктуры InP/InGaAs. Для исследования фотоэлектрических характеристик фоточувствительных элементов (ФЧЭ) приёмника (фотодиодов) на пластине с матричными структурами были предусмотрены также тестовые структуры линейного фотоприёмника формата 1×128 с шагом 88 мкм. Они имеют и самостоятельное значение, т.е. могут использоваться в качестве линейного фотоприёмника. Каждый ФЧЭ матричной и линейной структуры снабжён индиевым столбиком для флип-чип соединения с мультиплексором. Освещение фотоприёмника производится со стороны подложки InP.

На кристалле линейки, установленном на сапфировую пластину толщиной 500 мкм, измерены при комнатной температуре темновые *IV* и *CV* характеристики, а также спектральные зависимости фотоотклика.

Для создания контактов по краям обратной стороны подложки InP наносился индий, а на лицевой стороне прецизионным нанесением индия замыкались 50 фотодиодов площадью 70×70 мкм<sup>2</sup>, затем на сапфировой пластине монтировались проволочные выводы.

Пересчётом на один элемент (фотодиод) получены усреднённые значения по массиву из 50 ФЧЭ. Таким образом установлено, что при обратном смещении 2 В темновой ток ФЧЭ составляет единицы пА, а ёмкость ФЧЭ – на уровне 0.8 пФ. Область спектральной чувствительности типична для этого материала – 0.95...1.7 мкм, максимум спектральной чувствительности 0.67 А/Вт достигается при  $\lambda=1.6$  мкм.

Для измерения неравномерности темновых токов по массиву ФЧЭ изготовлен модуль, включающий кристалл линейки, смонтированный флип-чип методом на сапфировой пластине с разводкой металлизированными контактными шинами. На этом модуле проведены выборочные измерения темновых вольтамперных характеристик отдельных фотодиодов линейки. Обнаружен значительный (на порядок) разброс значений темнового тока – от нескольких пА до 30÷40 пА.

Результаты проведённого исследования позволяют заключить, что созданные матричные структуры по уровню темновых токов и величине фоточувствительности способны в сочетании с ПЗС или КМОП мультиплексором обеспечить пороговые характеристики гибридного матричного фотоприёмника в ближнем ИК диапазоне 0.95...1.7 мкм на уровне работы в режиме ограничения фоном при реальных уровнях фоновой засветки.

## Ультратонкие резонансные поглотители для болометрических детекторов субмиллиметрового диапазона

С.А. Кузнецов<sup>1,2,3</sup>, А.Г. Паулиш<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

<sup>2</sup> Новосибирский филиал института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИМП», 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 2/1

<sup>3</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 11

тел: (383) 363-4019, факс: (383) 363-4019, эл. почта: SAKuznetsov@nsm.nsu.ru

В технике субмиллиметровых волн большую актуальность представляет создание одноканальных и матричных детекторов излучения, одновременно сочетающих относительно высокое быстродействие и чувствительность, а также спектральную и поляризационную селективность. Последние свойства, в частности, позволяют измерять или осуществлять мониторинг спектра и поляризации источников субмм-излучения, а также повысить информативность системы регистрации рассеянного на объекте излучения за счет его спектральной и поляризационной дискриминации. Одним из наиболее эффективных подходов к решению поставленной задачи является болометрический метод, в котором субмм-излучение поглощается ультратонким резонансным поглотителем с толщиной  $d$  много меньше рабочей длины волны  $\lambda$  и имеющем коэффициент поглощения близкий к 100% [1]. В этом случае минимизация величины  $d$  позволяет предельно снизить теплоёмкость поглотителя и, соответственно, время отклика болометрического детектора.

В настоящей работе рассматривается электродинамика ультратонких поглотителей, реализуемых по типу однослойной высокоимпедансной поверхности (ВИП), работающей как магнитный метаматериал. Такая ВИП подразумевает использование металлизированной с обратной стороны диэлектрической пленки с толщиной  $d/\lambda \ll 1$ , на открытую к субмм-излучению поверхность которой нанесена частотно-избирательная поверхность с емкостным импедансом. При условии  $d/\lambda \ll 1$  импеданс заземленного диэлектрического слоя является чисто индуктивным, что заставляет работать ВИП как  $LC$ -контур, фаза отражения которого резонансной частоте проходит через нулевое значение, формируя пучность электрического поля на поверхности ВИП. Введение правильным образом омических и диэлектрических потерь в подобную структуру позволяет реализовать коэффициент поглощения  $A \approx 1$ . Отметим, что неотъемлемым свойством подобных поглотителей является их спектральная узкополосность.

В представленной работе экспериментально продемонстрированы высокоэффективные поляризационно-селективные резонансные поглотители на диапазон 0.094-0.36 ТГц, реализованные на базе полипропиленовых пленок толщиной 15 мкм ( $\lambda/d = 56 \div 212$ ), характерная ширина полосы поглощения для которых составляет 4÷6%. Обсуждаются вопросы интеграции подобных поглотителей с болометрическими детекторами различных типов.

Работа поддержана Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания “ГЗ–проект № 3002”.

### Литература

[1] S. A. Kuznetsov et al., Proc. SPIE, **8423**, 84230S (2012).

## Микроструктурные квазиоптические селективные элементы для диапазонов миллиметровых и терагерцовых волн

С.А. Кузнецов

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

<sup>2</sup> Новосибирский филиал института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
«КТИМП», 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 2/1

<sup>3</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 11

тел: (383) 363-4019, факс: (383) 363-4019, эл. почта: [SAKuznetsov@nsm.nsu.ru](mailto:SAKuznetsov@nsm.nsu.ru)

Развитие техники исследований в диапазоне миллиметровых/терагерцовых волн электромагнитного спектра требует создания широкого класса квазиоптических устройств для управления характеристиками пучков мм/ТГц излучения, распространяющихся в свободном пространстве. Во многих случаях их амплитудно-частотная, поляризационная и фазовая селекция наилучшим образом обеспечивается при использовании планарных металлизированных микроструктур субволновой топологии, известных в микроволновой литературе как «частотно-избирательные поверхности» (ЧИП) [1], или в терминологии метаматериалов – «метаповерхности» [2]. ЧИП являются резонансными электродинамическими структурами, которые в отличие от дифракционных решеток эксплуатируются в режиме, когда резонансная частота лежит ниже точки возбуждения высших дифракционных гармоник. Имея для мм/ТГц-диапазонов характерные размеры элементов топологического рисунка от единиц до сотен мкм, ЧИП-структуры могут быть сравнительно недорого изготовлены посредством таких промышленных или полупромышленных технологий, как фотолитография, лазерная микрообработка, гальванопластика, LIGA.

В настоящем докладе представлен обзор экспериментальных результатов по разработке высокоэффективных селективных элементов на основе ЧИП-структур традиционных и новых типов, которые предназначены как для автономного применения, так и для интеграции с различными метрологическими системами, работающими в диапазоне частот от сотни ГГц до нескольких ТГц [3]. Селективные элементы включают частотные фильтры, преобразователи фазы и поляризации, плоские фокусирующие элементы, ультратонкие резонансные поглотители и болометрические детекторы на их основе. В большинстве случаев обсуждаемые устройства опережают российские и зарубежные аналоги по функциональным характеристикам.

Работа поддержана Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания “ГЗ–проект № 3002”.

### Литература

[1] B. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, NY: Wiley, 2000.

[2] Holloway C. L et al. *IEEE Antennas Propag. Mag.* **54**, 10–35 (2012).

[3] S.A. Kuznetsov et al., *Proc. 44th European Microwave Conf.*, 6-9 Oct 2014, Rome, Italy, pp. 881-884.

## Технологический контроль оптических материалов фотоники по параметру объёмного рассеяния

**С.В. Рыхлицкий, С.А. Дулин, В.Ю. Прокопьев, Е.К. Иванов,**  
Н.А. Аульченко, Н.И. Назаров  
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова,  
Новосибирск, 630090, Проспект академика Лаврентьева 13  
тел: (383) 333-3884, факс: (383) 333-2771, эл. почта: rhl@isp.nsc.ru

В современных приборах фотоники применяется широкий спектр материалов для изготовления оптических элементов: окон, линз, призм и др. Большинству из них, будь то кристаллические, аморфные, искусственные или натуральные присуще объёмное рассеяние проходящего излучения. Оно оказывает, как правило, негативное влияние на работоспособность прибора и его предельные характеристики. Особенно актуален учет рассеянного излучения при построении изображающих камер и прецизионных измерительных устройств. Отечественная промышленность, на сегодняшний день, не выпускает штатных приборов для объективной оценки, сортировки и отбраковки оптических материалов по параметру объёмного рассеяния. В рамках решения данной задачи, разработаны методика и изготовлен измерительный комплекс КРС-2. Спектральный рефлектометрический комплекс КРС-2 предназначен для объективной оценки качества оптических материалов по параметру объёмного рассеяния, их сортировки и возможной отбраковки. В исследовательской практике возможно применение комплекса для измерения интенсивности светорассеяния в ряде прозрачных и мутных сред, таких как, кристаллы, стекло, жидкости, растворы, взвеси и др., с целью определения концентрации рассеивающих примесей, дефектов структуры, инородных включений и т.п. Кроме того, разработанный прибор, наряду с решением данных задач, позволяет определять диапазон прозрачности, наличие и спектр дихроизма, другие параметры, т.е., осуществлять комплексный контроль качества производимых оптических материалов.

Комплекс построен по модульному принципу, на основе высокоинтенсивного источника света и малогабаритного монохроматора МБМ-1М [1], полностью автоматизирован и управляется от ПК. Гибкое программное обеспечение, разработанное для ОС Windows 2000/XP обеспечивает управление прибором в различных режимах измерения, получение данных, вывод в численном и графическом виде измеренных спектров, их дальнейший анализ и обработку. Приводится описание прибора, его технические характеристики и применение.

### *Литература*

[1] С.В. Рыхлицкий, С.А. Дулин, и др., ПТЭ № 5, с. 162-163 (2006).

## Быстродействующее малоформатное ФПУ 64x64 элементов на основе антимионида индия

В.В. Карпов<sup>1</sup>, В.П. Астахов<sup>1</sup>, М.Е. Козырев<sup>1</sup>, **В.Ф. Чишко**<sup>1</sup>, В.И. Петренко<sup>1</sup>,  
В.И. Семенов<sup>1</sup>, Я.В. Гицилевич<sup>1</sup>, Д.В. Бородин<sup>2</sup>, Ю.В. Осипов<sup>2</sup>, В.В. Васильев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Швабе-Фотосистемы», Москва, 117545, Днепропетровский проезд 4А, стр.3А  
*тел: (495) 315-73-60, эл. почта: [otdel212@mail.ru](mailto:otdel212@mail.ru)*

<sup>2</sup> ООО "РТК Инпекс", 141013, МО, Мытищи, ул. Силикатная, 39Д

Переход в ряде изделий ВТ с фотоприемников первого поколения на фотоприемники второго поколения требует разработки быстродействующих матричных фотоприемных устройств (МФПУ) относительно небольшого формата с непрерывным выводом покадровой информации. В качестве матричного фоточувствительного элемента в разработанном МФПУ использовалась матрица фотодиодов на антимиониде индия формата 64x64 элемента с шагом 40 мкм с тонкой базовой областью, закрепленной на несущей кремниевой подложке с предварительно сформированным на ней интерференционным фильтром. Применение такого способа обеспечивает массовое изготовление МФЧЭ. Разработанная КМОП микросхема обеспечивала режим работы «считывание во время накопления» (IWR). Максимальная частота кадров при выводе информации на два выхода не менее 2 КГц. Ячейка микросхемы содержит емкости интегрирования  $C_i = 2$  пФ и выборки  $C_s = 0.2$  пФ, ключ переноса сигнала с емкости интегрирования на емкость выборки, входной подпороговый транзистор, два транзистора сброса, буферный и ключевой транзисторы вывода сигнала и транзистор антиблуминга. Микросхема разработана под стандартную КМОП технологию с проектными нормами 0,6 мкм, одним слоем поликремния и тремя слоями металла. Минимальное количество выводов для работы – 8. Рассеиваемая мощность не превышает 10 мВт при тактовой частоте до 5 МГц. Гибридизация МФЧЭ и микросхемы осуществлялась при помощи индиевых микро-столбиков. Измерения показали, что при времени накопления  $T_n \approx 0,5$  мс величина пороговой мощности к АЧТ с  $T = 573\text{K}$  не превышает  $8 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> при частоте кадров 1 КГц.

## Результаты экспериментального исследования электроуправляемого широкоспектрального объектива с жидкостными линзами

Д.В. Алантьев, С.В. Хрящев

Новосибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники» 630090, Россия,  
Новосибирск, Николаева, 8  
тел. (383) 330-91-11, эл. почта: alan80@inbox.ru

В статье представлены результаты экспериментального исследования основных параметров электроуправляемого широкоспектрального объектива с жидкостными линзами разработанного филиалом ИФП СО РАН «КТИПМ».

Разработанный электроуправляемый широкоспектральный объектив с жидкостными линзами предназначен для высокочувствительной камеры на ПЗС-матрице и имеет высокие расчетные показатели по коррективке хроматической аберрации положения в спектральном диапазоне длин волн 0,4...1 мкм. В оптической схеме объектива реализовано использование жидкостных оптических компонентов и электроуправляемой линзы с целью фокусировки на объект наблюдения в диапазоне расстояний от 300 мм до бесконечности.

Для подтверждения заявленных показателей измерены оптические и электрические характеристики: хроматизм положения, положение плоскости изображения при фокусировке, электрические характеристики электроуправляемой линзы для коррективки положения изображения на ПЗС-матрице.

Для измерения характеристик разработан измерительный стенд с использованием в качестве источников света набора лазерных диодов с длинами волн излучения заданного спектрально диапазона.

### *Литература*

- [1] Жидкие линзы – новая элементная база оптических и оптико-электронных приборов / А.В. Голицын, В.С. Ефремов, И.О. Михайлов, Н.В. Оревкова, Б.В. Федоров, В.Б. Шлишевский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. С. 7–11.
- [2] ГОСТ 20827-75. Здания и сооружения. Объективы съёмочные. Метод измерения хроматической аберрации положения: межгос. стандарт. – Введ. 01.07.1991. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 25 с.

## Коротковолновые спектрально-узкополосные тепловизионные приемники ИК излучения в физических исследованиях

**Б.Г. Вайнер**

Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН; НГУ  
Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 13  
тел: (383) 330-7781, факс: (383) 333-2771, эл. почта: BGV@isp.nsc.ru

Одним из ключевых разделов фотоники является обнаружение инфракрасного излучения квантовыми фотоприемниками, построенными, преимущественно, на основе узкозонных полупроводников. К этому направлению принадлежит и тепловизионная фотоника. Ее принципы основаны на том, что потоки тепловых фотонов, отражающие природные свойства физических объектов, преобразуются тепловизорами в электрические сигналы, формируя на количественном уровне изображение температурных полей, являющихся источниками этого излучения.

Рабочая полоса чувствительности стандартных интегральных (линейных и матричных) квантовых тепловизионных детекторов лежит в области среднего (3–5 мкм) или длинноволнового (8–14 мкм) ИК диапазона. В свою очередь, матричные охлаждаемые фотоприемники в гибридном исполнении, построенные на основе арсенида индия, отличающиеся спектральной узкополосностью и чувствительные в коротковолновой области инфракрасного спектра 2.5–3.05 мкм, занимают специальную нишу в тепловизионной фотоэлектронике [1]. На сегодняшний день такие ИК детекторы получили интенсивное развитие лишь в ИФП СО РАН. Однако, несмотря на неординарность этого технического решения, практическое применение таких оптоэлектронных устройств увенчалось целой серией общепризнанных пионерских результатов мирового уровня, опубликованных во многих отечественных и зарубежных монографиях и статьях [2–6 и др.].

В обзорном докладе освещены физические принципы функционирования спектрально-узкополосных коротковолновых оптоэлектронных структур, предназначенных для тепловизионного применения. Наглядно представлены основные источники физических ограничений чувствительности и динамического диапазона фотоэлементов. Приведены разнообразные примеры, подтверждающие высокую эффективность применения рассматриваемых тепловизионных детекторов в разных областях фундаментальной науки. Продемонстрированы новые методы прецизионных экспериментальных количественных измерений с использованием инструментальной базы коротковолновой спектрально-узкополосной тепловизионной фотоники. Показаны подходы к количественному анализу пространственно неоднородных источников тепловых фотонов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-02-07680).

### *Литература*

- [1] Г.Л.Курышев, А.П.Ковчавцев, Б.Г.Вайнер, и др., *Автометрия* **4**, 5-12 (1998).
- [2] B.G.Vainer, *Phys. Med. Biol.* **50**, R63-R94 (2005).
- [3] B.G.Vainer, in *Body temperature regulation*, Ed. A.B.Cisneros, B.L.Goins, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2009, p. 123-153.
- [4] B.G.Vainer, in *Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends*, Ed. C.Meola, Bentham e-Books, 2012, p. 61-84.
- [5] M.S.Mel'gunov, A.B.Ayupov, V.B.Fenelonov, B.G.Vainer, *Adsorption* **19**, 835-840 (2013).
- [6] B.G.Vainer, A.L.Markel, *Med. Hypotheses* **84**, 298-300 (2015).

## Исследования жидкостной оптики

Голицын А.В.<sup>1</sup>, Шелковников В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ», Новосибирск, 630090, просп. Акад. Лаврентьева, 2/1

<sup>2</sup> НИОХ СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева 9

тел: (383) 333-17-01, эл. почта: golitsyn@oesd.ru

В Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» и НИОХ СО РАН, с 2012 года ведутся исследования по использованию жидкостей в качестве оптических материалов для объективов оптико-электронных систем.

Жидкостные оптические материалы предоставляют существенно иной, по сравнению с твердотельными материалами, выбор комбинаций показателя преломления, коэффициента Аббе и частных дисперсий, а также позволяют снизить количество воздушных промежутков, отрицательно влияющих на светопропускание оптической системы. Возможность оперативного изменения оптической силы жидкостного компонента предоставляет компактную и дешевую реализацию автоматической фокусировки и изменения увеличения. Для исправления хроматических aberrаций в широком спектральном диапазоне, привлекательна возможность несложного получения оптической среды с точной подгонкой показателя преломления, дисперсии и частных дисперсий под требования конкретной разработки, в отличие от ограниченного набора комбинаций дискретных оптических характеристик у стекол.

В ходе информационных и экспериментальных исследований, найдены спектральные показатели преломления примерно 2000 жидкостей, обработанные и сведенные в каталог оптических материалов в формате программы для aberrационных расчетов оптических систем Zemax.

Разработан и исследован ряд макетов жидкостных линз с гидростатически управляемой оптической силой на базе электромагнитного актюатора и линейного пьезоэлектрического двигателя. Диапазон изменения оптической силы образцов составляет 12 диоптрий, а длительность перестройки в крайние положения 15 мс.

На базе электроуправляемой жидкостной линзы, разработан макет объектива для цифровых очков ночного видения на базе ПЗС камеры формата 1200×960, обеспечивающий близкое к дифракционному качество изображения в диапазоне дистанций наблюдения от бесконечности до 30 см. Исследуются алгоритмы автоматической фокусировки оптико-электронной системы, а также синтеза единого изображения из сканируемых по дистанции кадров, с практически неограниченной глубиной резко изображаемого пространства.

Разработаны также объективы видимого и ближнего ИК-диапазона 0.45-1 мкм, спектральный диапазон которых расширен за счет применения неуправляемых жидкостных линз, формируемых промежутками между твердотельными линзами. Проблема недостаточного спектрального диапазона весьма актуальна для современных приборов ночного видения и низкоуровневых телевизионных камер и прямо определяет дальность видения при пороговых значениях освещенности.

### Литература

- [1] Wohlfarth Ch., Wohlfarth B. Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology Group III: Condensed Matter, Volume 38 Optical Constants, Subvolume B Refractive Indices of Organic Liquids, Springer, Berlin 1996

## Численная оценка дисперсии «идеального» жидкостного оптического материала для устранения хроматизма положения

А.В. Голицын, Н.А. Сейфи

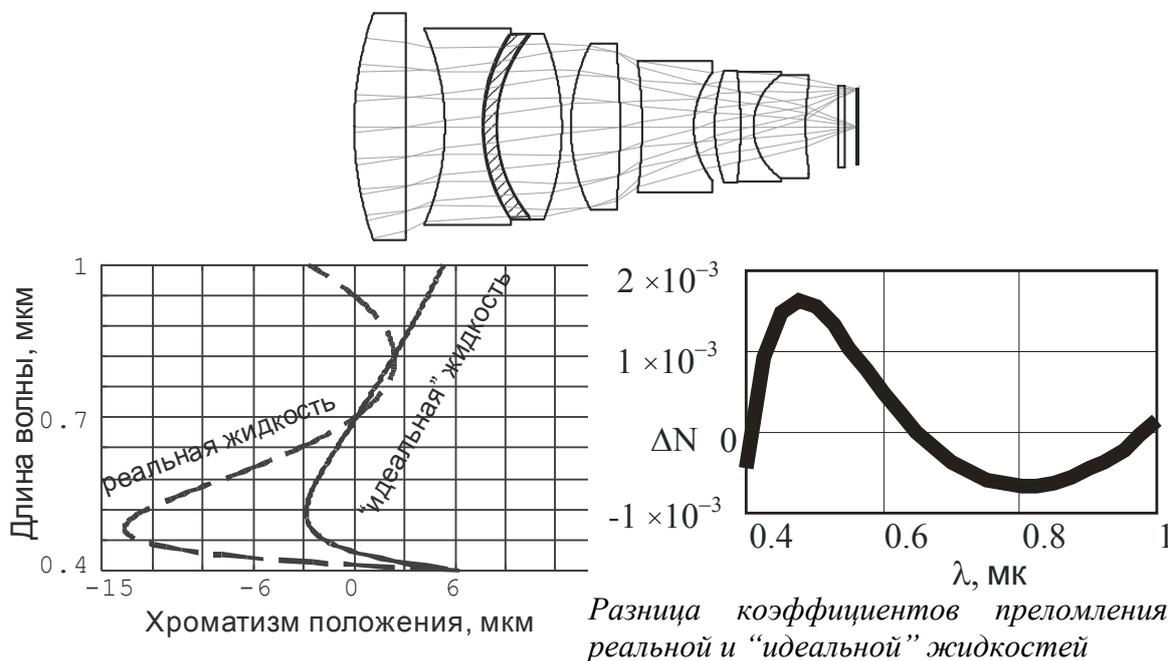
Филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ», Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева 2/1

тел: (383) 333-17-01, эл. почта: golitsyn@oesd.ru

Используемые в настоящее время оптические материалы характеризуются показателем преломления  $n_e$ , коэффициентом дисперсии  $v_e$  и относительной частной дисперсией  $P_{gf}$ . Такой набор спектральных характеристик позволяет рассчитывать объективы исправленные по хроматизму положения (фокальных плоскостей) для 3-4 длин волн. Прочие неисправленные длины волн образуют вторичный спектр ухудшающий качество изображения. В работе исследуются вопросы –возможно ли более тонкое управление спектральным ходом дисперсии оптического материала, какая требуется корректировка и каков ее потенциальный вклад в устранение хроматизма.

Для численной оценки требуемого порядка корректировки спектрального хода дисперсии в жидкостном оптическом материале и ее потенциального вклада, разработана модель многолинзового объектива ( $F=18$  мм,  $1:1.3$ ,  $\lambda=0.4-1$  мкм) с высокой степенью исправления хроматических aberrаций в широком спектральном диапазоне.

Жидкостный компонент реализован в виде объема жидкости с коэффициентом преломления  $N_d=1.456000$  в промежутке между 2й и 3й твердотельными линзами.



«Идеальный» требуемый ход дисперсии определялся оптимизацией мультиконфигурационной системы. Каждой из семи конфигураций сопоставлялась отдельная длина волны и соответствующий показатель преломления жидкости. Результирующий набор показателей преломления, в функции длины волны, аппроксимирован формулой Герцбергера для дальнейшего использования в модели оптической системы.

Требуемое отклонение хода дисперсии от реальной жидкости ( $N_d=1.456000$ ,  $v_d=58.8$ ) оценено в пределах  $1.5 \times 10^{-3}$ .

Расчетное снижение хроматизма положения за счет использования одного жидкостного компонента с откорректированным ходом дисперсии – в два раза.

## Перспективы использования электроуправляемых жидкостных линз в оптико-электронных системах

С.М. Борзов<sup>1</sup>, А.В. Голицын<sup>2</sup>, М.Ю. Цивинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. акад. Коптюга 1

<sup>2</sup> Филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ», Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева 2/1  
тел: (383) 333-17-01, эл. почта: golitsyn@oesd.ru

На базе электроуправляемой жидкостной линзы, разработан макет объектива для цифровых очков ночного видения (ОНВ) на базе ПЗС камеры формата 1200×960, обеспечивающий близкое к дифракционному качество изображения в диапазоне дистанций наблюдения от бесконечности до 30 см. Объектив имеет малую длительность перефокусировки (15 мс), предоставляющую новые функциональные возможности для ОНВ.

Одной из наиболее серьезных проблем в использовании ОНВ, использующих объектив с высоким относительным отверстием, является малая глубина резко отображаемого пространства, вынуждающая пользователя уделять внимание и время фокусировке изображения в ущерб выполняемым задачам.

Наиболее очевидной возможностью является разработка цифровых ОНВ с процессором изображения, осуществляющим автоматическую фокусировку на основе анализа наблюдаемого изображения. Такой подход имеет ограничение для сцен, включающих существенно различные плоскости фокусировки.

Вторая возможность заключается в последовательном сканировании объективом цифровых ОНВ заданных плоскостей фокусировки с последующим синтезом единого кадра с практически не ограниченной глубиной резко отображаемого пространства.



*Кадры, сделанные с различных плоскостей фокусировки от 300 до 3000 мм*



*Синтезированный кадр содержит достаточно резкое отображение всей сцены содержащей детали на глубине от 300 до 3000 мм.*

Синтез кадра из нескольких плоскостей понижает частоту отображаемых кадров пропорционально количеству используемых плоскостей фокусировки, и препятствует, соответственно, понижению частоты кадров для повышения отношения сигнал/шум.

Возможности автофокусировки и синтеза сканируемых плоскостей фокусировки могут комбинироваться за счет автоматического обнаружения информативных плоскостей фокусировки.

## Реализация алгоритма кусочно-линейного изменения контрастности изображения в приборах наблюдения

А.А. Голицын

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, 630090, Лаврентьева, 2/1

тел: (383) 330-9188, эл. почта: aag-09@yandex.ru

В тракте получения и обработки изображения приборов наблюдения традиционно применяются различные алгоритмы изменения изображения. Цель применения алгоритмов – визуальное улучшение изображения, т.е. повышение его информативности при наблюдении оператором.

Одним из самых распространенных способов изменения изображения является изменение его контрастности [1]. Визуальное улучшение изображения при этом связано с использованием полного динамического диапазона экрана, на котором данное изображение наблюдается.

Однако, повышение контрастности изображения не всегда приводит к его визуальному улучшению. Например, при одновременном нахождении в поле зрения темных и ярких объектов информативность итогового изображения может снизиться из-за того, что яркий объект начинает маскировать детали фона, уводя его в «недосвет» или «пересвет». Характерным признаком появления этого эффекта является ярковыраженная двухмодальность гистограммы изображения при значительно разнесенных друг относительно друга пиках интенсивности излучения.

В работе представлен способ коррекции изображения с применением кусочно-линейного выравнивания (эквализации) гистограммы. Кусочно-линейное изменение гистограммы равномерно распределяет уровни интенсивности изображения по градациям яркости устройства отображения и при этом не выводит отдельные элементы в насыщение, что позволяет увеличить общую информативность изображения прибора, а не информативность одной области изображения в ущерб информативности других областей.

Апробация алгоритма изменения изображения на «реальных сценах» произведена в различных условиях на базе реконфигурируемой системы получения и обработки изображения.

Достигнута устойчивая работа алгоритма в реальном времени, что позволяет применять его в тракте обработки изображения в составе приборов наблюдения различного класса.

### *Литература*

[1] Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П. и др. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. Пособие, Изд-во НГТУ, Новосибирск. 2002, 352 с.

# Быстродействующая малопотребляющая кремниевая интегральная схема считывания формата 384×288 для матричных ИК фотоприемников средневолнового и длинноволнового диапазонов

С.А. Дворецкий<sup>1</sup>, А.В. Зверев<sup>1</sup>, Ю.С. Макаров<sup>1</sup>, Е.А. Михантьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова,  
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13  
тел: 8-923-134-6760, эл. почта: makarov.zgr@gmail.com

Основной задачей кремниевых интегральных схем считывания (КИС) является регистрация интенсивности потока ИК излучения, падающего на матрицу фоточувствительных элементов, и последующий вывод полученной информации для построения изображения. Интенсивность потока ИК излучения, падающего на фотодиод и доля полезной информации, содержащаяся в этом потоке зависят от диапазона длин волн и окружающего фона, в котором предполагается вести наблюдение за интересующими объектами. В средневолновом и длинноволновом ИК диапазонах необходимо регистрировать слабый сигнал от теплового объекта в условиях сильной фоновой засветки. Для таких потоков ИК излучения используются ячейки с прямой инжекцией, ключевой характеристикой которых является их зарядовая емкость. Увеличение этой емкости увеличивает время интегрирования сигнала, что увеличивает соотношение сигнал/шум [1]. Это приводит к увеличению температурного разрешения.

Была спроектирована и протестирована КИС формата 384x288 с шагом ячеек 25 мкм для матричных ИК фотоприемников с диапазонами длин волн 3-5 мкм и 8-12 мкм. Основные характеристики КИС: техпроцесс 0,6 мкм, зарядовая емкость ячейки не менее  $2,1 \cdot 10^7 e^-$ , максимальная частота вывода информации 20 МГц, потребляемая мощность не более 100 мВт.

## **Функциональные возможности КИС**

Установлены цифро-аналоговые преобразователи, используемые для задания напряжения смещения фоточувствительных элементов и для напряжений, управляющих системой тестирования и антиблуминга.

Управление режимами работы с помощью последовательного интерфейса.

1. Обеспечивает прием и накопление электрического заряда от каждого фотодиода матрицы одновременно в течение заданного времени посредством схемы прямой инжекции.
2. Позволяет считывать сигнальную информацию одновременно по четырем выходам, а также используя только два или один выход.
3. Может вести прием и накопление заряда от фоточувствительных элементов одновременно со считыванием сигнальной информации, полученной в процессе предыдущего акта приема и накопления заряда.
4. Предусмотрена возможность выбора подматрицы прямоугольной формы произвольного размера и расположения, из которой будет считываться видеосигнал (режим «окна»).
5. Предусмотрена возможность выбора величины зарядовой емкости ячейки между двумя фиксированными значениями с помощью интерфейса управления.

## **Литература**

- [1] A. Rogalski, *Infrared Detectors* – 2nd ed., **744**, 876 (2011).

## **Малопотребляющий высокоскоростной модуль Ethernet 1G для многоканальных оптико-электронных приборов**

Г.Е. Журов, М.Ю. Цивинский

Филиал ИФП СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева, 2/1  
*тел: (383) 330-91-11, эл. почта: m\_tsiv@mail.ru*

Разработан модуль Ethernet 1G для применения во встраиваемых системах, в том числе в портативных приборах. Модуль входит в состав семейства модулей для построения систем обработки потоков данных в многоканальных приборах. В качестве головного модуля выступает разработанная ранее высокопроизводительная реконфигурируемая вычислительная платформа.

Разработанный модуль состоит из собственно аппаратной части, IP ядра на ПЛИС и библиотеки для хоста, которая позволяет использовать модуль различным прикладным программам.

Аппаратная часть выполнена в виде отдельной платы Ethernet 1G, которая стыкуется с реконфигурируемой вычислительной платформой.

IP ядро для ПЛИС представляет собой реализацию стека IP/UDP, а также ряда вспомогательных функций, например ARP, ICMP и т.д.

Библиотека для хоста реализована в виде динамической библиотеки (dll) и позволяет работать с устройством в режиме высокоскоростной потоковой передачи данных в режиме реального времени.

В ходе проведенных испытаний были получены показатели скорости передачи данных близкие к теоретическому пределу (порядка 99.9% от теоретически возможной), что составляет около 957 Мбит в секунду в одном направлении или 2\*957 Мбит в секунду в обоих направлениях.

Данный модуль применен в новой разработке института — многоканальном приборе с высокими требованиями к скорости передачи потоков данных.

### ***Литература***

[1] Г.Е. Журов, М.Ю. Цивинский. Универсальная модульная реконфигурируемая система для обработки сигналов тепловизионных и многоканальных приборов в реальном времени. Известия вузов. Приборостроение. 2014, Том 57, №5. стр. 44-46 (2014).

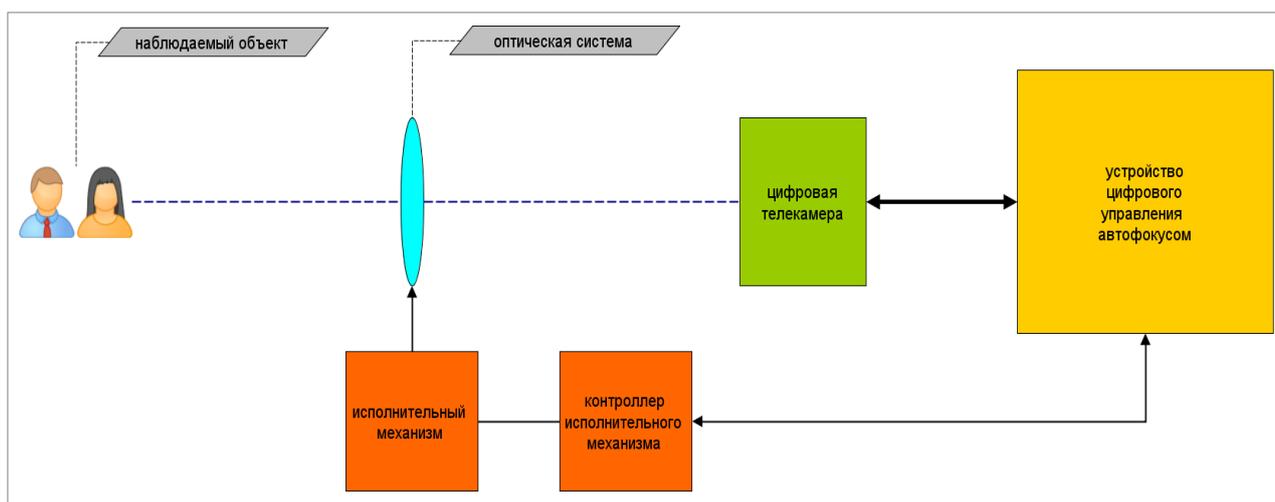
# Исследование и реализация алгоритмов автофокусировки для видимого и теплового спектральных диапазонов

М.Ю. Цивинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Филиал ИФП СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева, 2/1  
тел: (383) 330-91-11, эл. почта: m\_tsiv@mail.ru

Проведен анализ большого ряда известных алгоритмов автофокусировки [1]. Анализ заключался в непосредственном тестировании ряда выбранных алгоритмов в различных условиях.

Общая структурная схема системы автофокусировки приведена на Рис. 1.



В качестве оптической системы использовались три различных типа объективов:

- объектив с управляемой (фокус) жидкой линзой [2], видимый диапазон
- объектив с классическим управлением фокусом, видимый диапазон
- объектив с классическим управлением фокусом, диапазон 8-12 мкм

Для всех трех типов объективов (и оптико-электронных систем на базе них) была выполнена законченная реализация алгоритма автофокусировки. Для системы с жидкой линзой в качестве управляемого компонента возникает ряд принципиально новых возможностей (и, соответственно, задач), которые не существуют для систем с классическим управлением.

## Литература

[1] Eric Paul Krotlov, Active Computer Vision by Cooperative Focus and Stereo, Springer-Verlag, New York. 1989.

[2] Жидкие линзы – новая элементная база оптических и оптико-электронных приборов / А.В. Голицын, В.С. Ефремов, И.О. Михайлов, Н.В. Оревкова, Б.В. Федоров, В.Б. Шлишевский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 7–11.

## Сканирующий инфракрасный микроскоп с высоким пространственным разрешением

И.В. Мжельский<sup>1</sup>, В.М. Базовкин<sup>1</sup>, В.Г. Половинкин<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск 630090, просп. Академика Лаврентьева, 13, Россия

<sup>2</sup> НГТУ, 630073, г. Новосибирск, просп. К.Маркса, 20, Россия  
тел: (383)330-7781, факс: (383)330-5256, эл. почта: [bazovkin@mail.ru](mailto:bazovkin@mail.ru)

Инфракрасная микроскопия собственного излучения микрообъектов отличается от микроскопии с внешней подсветкой и представляет существенный интерес как в научном так в практическом планах.

В работе проведен анализ зависимости предельного пространственного разрешения от длины волны красного края поглощения его фотоприёмника при наблюдении сцен собственного излучения объектов.

Показано, что пространственное разрешение зависит от длины волны красного края поглощения фотоприёмника и имеет оптимум, определяемый светосилой объектива и зарядовой ёмкостью кремниевого мультиплексора фотоприёмного устройства (ФПУ).

Оптимальная длина волны красного края поглощения фотоприёмника зависит также от тепловых контрастов сцены и находится в диапазоне 3 – 5 мкм.

Представлена разработка сканирующего инфракрасного микроскопа с высоким пространственным разрешением [1]. В состав микроскопа входят две инфракрасных камеры:

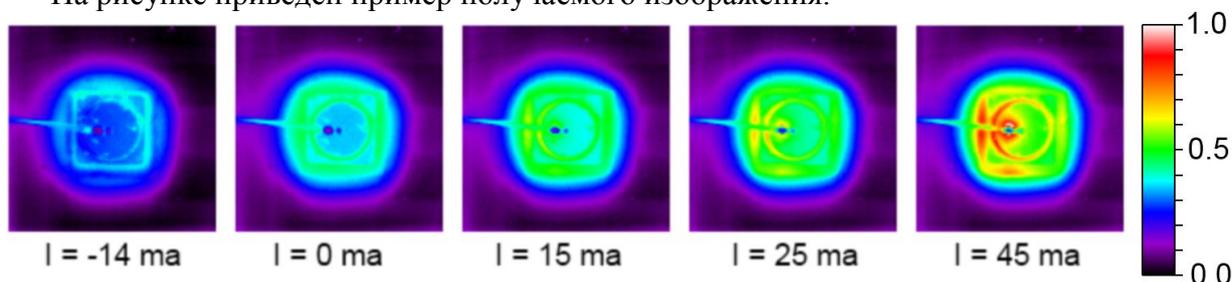
- спектрального диапазона 2.5 – 3.1 мкм на основе ФПУ InAs 128×128 элементов,
- спектрального диапазона 1.2 – 5.4 мкм на основе ФПУ InSb 1х384 элементов.

Применение оригинального экранирующего зеркала, позволило ослабить на порядок уровень комнатного фона и для некоторых сцен достичь чувствительности NETD ~ 25 мК.

Для преобразования интенсивности сигнала элементов ФПУ в температуру применен оригинальный дифференциальный метод калибровки [2].

Реализован механический сканер с точностью позиционирования ~ 0.1 длины волны или ~ 0.3 мкм, позволяющий получать тепловое изображение объекта в поле до 100×50 мм.

На рисунке приведен пример получаемого изображения.



Распределение интенсивности излучения с поверхности ИК диода в зависимости от тока. Спектр фоточувствительности представленного диода имеет полуширину ~0.7 мкм и максимум при ~4.5 мкм (300 К). Образцы предоставлены ФТИ имени Иоффе, г. С. Петербург.

### Литература

- [1] В.М. Базовкин, И.В. Мжельский, Г.Л. Курышев, В.Г. Половинкин. *Автометрия* **47**, 98. (2011).
- [2] Г.Л. Курышев, И.В. Мжельский, А.Е. Настовьяк, В.Г. Половинкин. *Автометрия* **47**, 103. (2011).

## Формирование и исследование свободных пленок VO<sub>2</sub>, предназначенных для ИК и терагерцовых фотоприемников

С.В. Мутилин<sup>1</sup>, Л.В. Яковкина<sup>2</sup>, Н.Д. Волчок<sup>2</sup>, А.Ф. Булдыгин<sup>1</sup>, В.Я. Принц<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИФП СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
<sup>2</sup>ИНХ СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090, Россия  
тел: (383)333-06-99, факс: (383)330-56-36, эл. почта: [mutilin@isp.nsc.ru](mailto:mutilin@isp.nsc.ru)

Диоксид ванадия (VO<sub>2</sub>) является перспективным материалом для ИК и терагерцовых фотоприемников [1-3]. Работа фотоприемников основана на уникальных свойствах VO<sub>2</sub>, связанных с фазовым переходом полупроводник-металл (изменение сопротивления до 5 порядков, кардинальное изменение спектров поглощения и пропускания).

Представлен современный обзор работ в области использования фазового перехода в VO<sub>2</sub> для регистрации ИК и терагерцового излучения.

Приведены оригинальные результаты по выращиванию моноклинных пленок VO<sub>2</sub> методом химического осаждения из газовой фазы на подложках сапфира и кремния, отсоединению выращенных пленок от подложек и исследованию их оптических и электрофизических характеристик. Полученные пленки изменяют свою проводимость при фазовом переходе более чем на 4 порядка. Рассматриваются различные подходы в детектировании ИК и терагерцового излучения, основанные на эффекте гистерезиса при фазовом переходе. Приведены результаты неразогревающего инициирования СВЧ-излучением фазового перехода в пленках VO<sub>2</sub>, которое может быть использовано для сверхбыстрого управления фазовым переходом и, следовательно, излучением.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 14-29-10261 офи\_м, и стипендией Президента СП-2728.2013.5.

### *Литература*

- [1] Nakajima M., Takubo N., Hiroi Z. et al., Appl. Phys. Lett. **97** (2010)
- [2] Zhao Y., Lee J.H., Zhu Y., et al. J. Appl. Phys. **111** (2012)
- [3] Dumas-Bouchiat F., Champeaux C., Catherinot A. et al. Appl. Phys. Lett. **91** (2007).

## **Гипер- и ультраспектральная видеоспектрометрия: методические и технические аспекты**

Г.Г. Горбунов <sup>1</sup>, К.Н. Чиков <sup>2</sup>, В.Б. Шлишевский <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова,  
Санкт-Петербург, 199053, Кадетская линия В. О., д. 5, корп. 2

<sup>2</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., д. 49

<sup>3</sup> Новосибирский филиал ИФП СО РАН «КТИПМ»,  
Новосибирск, 630090, пр-кт акад. Лаврентьева, д. 2/1  
*тел./факс: (383) 330-9106, эл. почта: oos@oesd.ru*

Гипер- и ультраспектральная видеоспектрометрия сформировалась благодаря появлению высокочувствительных и малоинерционных многоэлементных приемников излучения и в основе своей базируется на новых технологиях распознавания не только по топологическим, но и по спектрально-топологическим и спектральным образам, выявляемым с помощью методов и приемов детального (с числом элементов разрешения от сотен до тысяч) спектрометрирования.

Небольшие по габаритам, светосильные и высокоскоростные бортовые видеоспектрометры (ВС) обеспечивают скрупулезную поэлементную регистрацию как спектров, так и геометрической структуры изучаемых объектов, скрытых самыми изощренными средствами естественной и искусственной маскировки на фоне Земли или околоземного пространства. При этом обработка видеоспектральных данных хорошо поддается автоматизации. В то же время, частой особенностью аппаратурного построения видеоспектральных средств является объединение ВС со специальным телевизионным модулем, позволяющим оператору на борту носителя или в камеральных (лабораторных) условиях анализировать всю наблюдаемую в данный момент картину в реальном масштабе времени.

Наиболее полно позитивные свойства ВС раскрываются при выполнении научных и прикладных исследований, когда требуется получить высококачественные монохроматические изображения объектов естественного и/или искусственного происхождения и одновременно распознать в них структурные элементы с предельно близкими «цветами» – задача, абсолютно невыполнимая традиционными аэрокосмическими методами.

В докладе обсуждаются отдельные методические и технические аспекты построения дисперсионных и интерференционных гипер- и ультраспектральных ВС.

## Быстродействующий неохлаждаемый тепловой приемник излучения на основе тонких пироэлектрических пленок

Э.Г. Косцов, В.С. Соболев

ФГУБН Институт автоматики и электрометрии СО РАН,

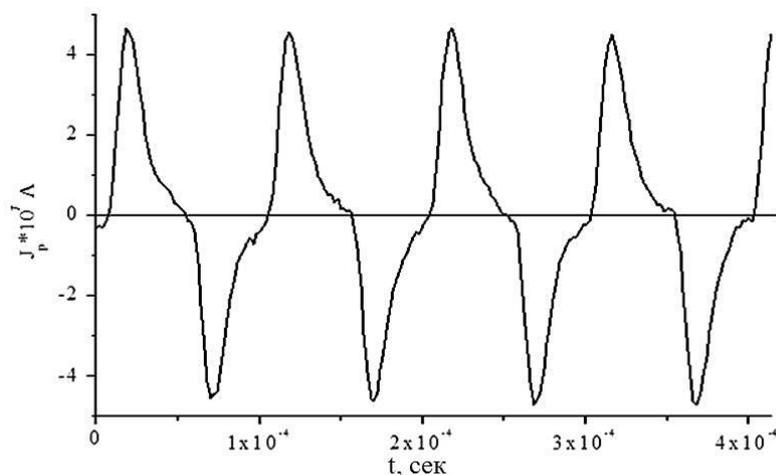
Новосибирск, 630090, пр. ак. Коптюга, д.1

тел: (383) 330-79-86, факс: (383) 330-88-78, эл. почта: kostsov@iae.nsk.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований чувствительности тонкопленочных структур ПТО – монокристаллическая пироэлектрическая пленка – поглощающий электрод, Ni, Cr, к воздействию коротких импульсов излучения. Структуры синтезировались методом плазмо- химического ВЧ напыления на подложках из сапфира или кремния, они не теплоизолировались от подложки, площадь электродов  $1-100 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ . В качестве пироэлектрика использовался материал с высоким значением пироэлектрического коэффициента,  $\gamma$ , - ниобат бария стронция  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ , (SBN), модифицированный  $\text{La}_2\text{O}_3$ . Величина  $\gamma$  в пленках таких материалов с толщиной  $d = 0.5 - 3 \text{ мкм}$  имела значение  $1-2 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^2\text{град}$ . Приемник чувствителен как к ультрафиолетовому, так и к ИК - излучению. В качестве источника излучения использовался лазер, генерирующий импульсы излучения с мощностью 2 мВт и с длительностью от 1 до 100 мкс, при протяженности фронта менее 25 нс и частотой повторения 10 – 700 кГц.

Величина импульсного пироэлектрического тока,  $J_p$ , регистрировалась с помощью быстродействующего трансимпедансного усилителя с фронтом не более 100 нс.

Типичное поведение пироэлектрического тока,  $J_p$ , в указанных структурах, с толщиной пленки SBN 2.9 мкм, при модуляции излучения с частотой 10 кГц представлено на рисунке.



Исследовался режим накопления заряда на частотах модуляции 10 – 700 кГц, при этом пироэлектрический ток подвергался двухполупериодному выпрямлению. При оптимальной, относительно величины генерируемого в пироэлектрической пленке заряда, частоте модуляции 500 кГц коэффициент накопления составил  $10^4$ . Минимальная длительность импульса регистрируемого пироэлектрического тока была 1 мкс. Установлено, что максимальная величина генерируемого заряда энергией, поступающей на образец за один такт, длительность которого меньше времени перемещения тепловым фронтом межэлектродного расстояния, близка к  $10^{-4} \text{ Кл/Дж}$ , это при указанных значениях  $\gamma$  и  $d$  соответствует предельной теоретически возможной величине.

Элемент может быть использован при построении высокочувствительных мегапиксельных ИК – матриц тепловых приемников, с частотой кадров 100 и более Гц, создаваемых без использования MEMS - технологии.

# Визуализация и дистанционное зондирование объектов в диапазоне миллиметровых волн с использованием техники ЛЧМ-радара

С.А. Кузнецов<sup>1,2,3</sup>, С.Н. Макаров<sup>1</sup>, В.Н. Кошеленко<sup>1</sup>, А.В. Аржанников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

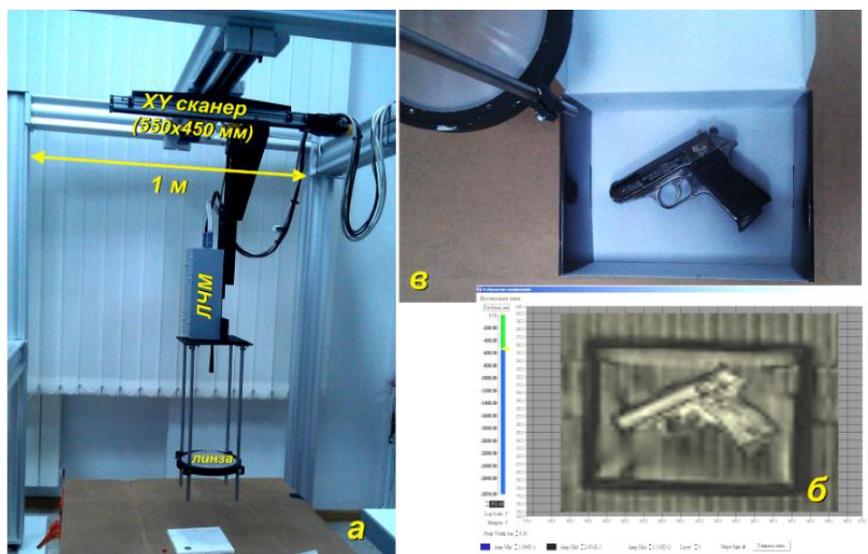
<sup>2</sup> Новосибирский филиал института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИМП», 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 2/1

<sup>3</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 11

тел: (383) 363-4019, факс: (383) 363-4019, эл. почта: SAKuznetsov@nsm.nsu.ru

Коротковолновая часть миллиметрового диапазона длин волн электромагнитного спектра ( $\lambda=1-4$  мм) представляет большой интерес для различных приложений по причине более высокой проникающей способности мм-излучения сквозь атмосферу и различные оптически непрозрачные среды в сравнении с терагерцовым и ИК диапазонами, равно как и ввиду возможности достижения пространственного разрешения на уровне нескольких мм, приемлемого для получения изображений скрытых объектов [1, 2]. Подобные свойства мм-волн делают их привлекательными в задачах неразрушающего контроля качества материалов, дистанционного зондирования и локации местности, в системах безопасности и скрытого наблюдения.

В настоящей работе описываются действующие прототипы систем визуализации и дистанционного зондирования объектов, выполненные на базе твердотельных радарных модулей, работающих на длинах волн 2 и 4 мм и использующих технику линейной частотной модуляции (ЛЧМ) выходного излучения для измерения абсолютного расстояния  $Z$  до исследуемого объекта [3]. Имея динамический диапазон измерений 60 дБ и диапазон перестройки 1 ГГц, радарные системы реализованы на GaAs смесителях Шотки и представлены в двух модификациях: ближнего ( $Z < 1$  м) и дальнего ( $Z = 1 \div 50$  м) радиуса действия. В первом случае радар совмещается с механическим 2D сканером и системой фокусировки излучения на объекте, позволяя получать изображение с латеральным пространственным разрешением, близким к дифракционному пределу (см. Рис.). Во втором случае пространство сканируется широким пучком, перекрывая область  $1 \div 2$  м в поперечнике с целью оперативного поиска высокоотражающих элементов на удаленном объекте.



(а) Система визуализации ближнего радиуса действия на базе 2-мм ЛЧМ радара; (б) изображение керамического пистолета в пластиковой коробке на длине волн  $\lambda=2.14$  мм и его оптическая фотография (в).

дуляции (ЛЧМ) выходного излучения для измерения абсолютного расстояния  $Z$  до исследуемого объекта [3]. Имея динамический диапазон измерений 60 дБ и диапазон перестройки 1 ГГц, радарные системы реализованы на GaAs смесителях Шотки и представлены в двух модификациях: ближнего ( $Z < 1$  м) и дальнего ( $Z = 1 \div 50$  м) радиуса действия. В первом случае радар совмещается с механическим 2D сканером и системой фокусировки излучения на объекте, позволяя получать изображение с латеральным пространственным разрешением, близким к дифракционному пределу (см. Рис.). Во втором случае пространство сканируется широким пучком, перекрывая область  $1 \div 2$  м в поперечнике с целью оперативного поиска высокоотражающих элементов на удаленном объекте.

## Литература

- [1] R. Appleby and R. N. Anderton, Proc. IEEE, **95**, 1683–1690 (2007).
- [2] D. J. Daniels, *EM Detection of Concealed Targets*, Wiley-IEEE Press, 2010.
- [3] S. A. Kuznetsov et al., Proc. Int. Conf. “IRMMW-THZ 2014”, P1-8 M5-P1.8.

## Фильтры высоких частот и плоские фокусаторы субмиллиметрового диапазона на основе LIGA-структур

С.А. Кузнецов<sup>1,2,3</sup>, М.А. Астафьев<sup>1</sup>, А.В. Генцелев<sup>3</sup>, С.Г. Баев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

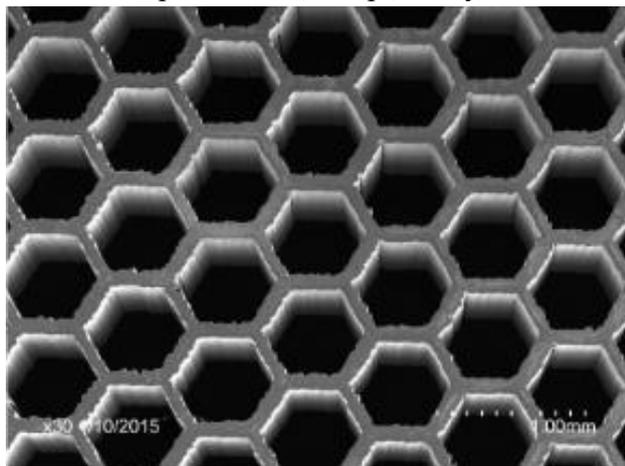
<sup>2</sup> Новосибирский филиал института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИМП», 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 2/1

<sup>3</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 11

<sup>4</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 1  
тел: (383) 363-4019, факс: (383) 363-4019, эл. почта: SAKuznetsov@nsm.nsu.ru

Планарные металлические структуры субволновой топологии являются одним из наиболее эффективных методов управления амплитудно-частотными, поляризационными и фазовыми характеристиками электромагнитного излучения от СВЧ диапазона вплоть до оптических частот. Известные в микроволновой литературе как «частотно-избирательные поверхности» (ЧИП), такие структуры находят широкое применение в квазиоптической технике мм-, субмм- и ТГц-волн ввиду возможности относительно недорого и качественного производства ЧИП большой апертуры фотолитографическими методами, идеально подходящими для создания микроструктур с топологическими размерами от единиц до сотен микрон [1].

Отметим, что из-за дифракционных ограничений фотолитография принципиально не позволяет получать качественные ЧИП с аспектным отношением более  $1.5 \div 2$ . Такие ограничения снимаются при переходе к технологии LIGA, базирующейся на методах глубокой рентгеновской литографии и предназначенной для получения микроструктур в широком диапазоне толщин: от нескольких мкм до нескольких мм при аспектном отношении до 100 и более [2]. Самонесущие толстометаллические ЧИП являются предпочтительнее тонкометаллических в ряде задач, напр., для увеличения крутизны фронта АЧХ при частотно-полосовой фильтрации, а также при реализации плоских фокусирующих элементов.



Настоящая работа посвящена разработке высокоэффективных фильтров высоких частот и плоских фокусаторов на базе LIGA-структур, оптимизированных на диапазон 0.3–0.7 ТГц. Структуры изготавливаются посредством рентгенолитографического структурирования слоя ПММА толщиной 1 мм через рентгеношаблон на основе латунной фольги, получаемый ее прецизионной лазерной резкой импульсным лазером наносекундной длительности, с последующей металлизацией всей поверхности диэлектрика слоем Ag толщиной 1 мкм. В LIGA-структурах реализована топология сквозных шестиугольных отверстий с минимальной шириной перемычек  $65 \div 70$  мкм (см. Рис).

Работа поддержана Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания “ГЗ–проект № 3002”.

### Литература

[1] S. A. Kuznetsov et al., Proc. 44th European Microwave Conf., 6–9 Oct 2014, Rome, Italy, pp. 881–884.

[2] С.А. Кузнецов и др., Поверхность, **9**, 38–49 (2009).

## Фокусировка субмиллиметрового излучения в сложные области посредством субволновых голографических структур

С.А. Кузнецов<sup>1,2,3</sup>, М.А. Астафьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

<sup>2</sup> Новосибирский филиал института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИМП», 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 2/1

<sup>3</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 11

тел: (383) 363-4019, факс: (383) 363-4019, эл. почта: SAKuznetsov@nsm.nsu.ru

Планарные металлические микроструктуры субволновой топологии (ММСТ) находят широкое применение в квазиоптической технике миллиметровых, субмиллиметровых и терагерцевых волн, выступая одним из наиболее эффективных подходов в задачах амплитудно-частотной, поляризационной и фазовой селекции пучков излучения [1]. Посредством соответствующего выбора топологического рисунка составляющих ММСТ элементарных ячеек подобные структуры могут быть оптимизированы под заданную длину волны  $\lambda$ , имеют толщину зачастую меньше или много меньше  $\lambda$ , а также позволяют реализовать лучшие функциональные характеристики в сравнении с традиционными решениями, известными в оптике.

Среди перспективных приложений ММСТ следует отметить возможность контроля пространственного распределения фазы пропускания/отражения вдоль поверхности структуры с целью управления волновым фронтом прошедшего/отраженного излучения и, в частности, достижения его фокусировки. Последнее позволяет создавать тонкие и легковесные фокусирующие элементы, служащие привлекательной альтернативой более массивным и, как правило, более дорогостоящим линзам и кривым зеркалам. Применение методов компьютерной голографии [2] к подобным фокусаторам открывает возможность реализации фокусировки в произвольно сложную область через синтез соответствующего распределения фазы пропускания/отражения на поверхности структуры. При этом в отличие от традиционных дифракционных элементов с профилированной поверхностью, изготовление которых на мм/субмм/ТГц диапазоны представляется достаточно трудоемким ввиду необходимости прецизионного профилирования материала элемента на сравнительно большую глубину (оцениваемую от десятков до тысяч мкм), ММСТ-фокусаторы являются чисто плоскими.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальной реализации различных модификаций голографических ММСТ-фокусаторов отражательного и пропускающего типов, оптимизированных на частоты 0.35 и 0.65 ТГц. Имея дифракционную эффективность от 60 до 80%, фокусаторы реализованы на примере фокусировки в 1, 3 и 4 точки [3], а также в более сложные области в форме букв.

Работа поддержана Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания “ГЗ–проект № 3002”.

### Литература

[1] S. A. Kuznetsov et al., Proc. 44th European Microwave Conf., 6-9 Oct 2014, Rome, Italy, pp. 881-884.

[2] В. А. Сойфер, *Методы компьютерной оптики*, ФИЗМАТЛИТ, М. 2003.

[3] S. A. Kuznetsov et al., Scientific Reports, **5**, 7738 (2015).

## Стенд измерения фотоэлектрических параметров матричных фотоприемных устройств

В.В. Карпов, А.В. Мартиросов, В.И. Петренко, В.И. Семенов, **К.В. Чиж**  
“ОАО Швабе-Фотосистемы”, Москва, 117545, Днепропетровский пр., 4А, стр.3А  
тел: (495) 315-73-56, факс: (495) 312-26-22, эл. Почта: [ko-ckb@mail.ru](mailto:ko-ckb@mail.ru)

В наши дни разработана широкая номенклатура матричных фотоприемников (ФП), различных как по формату, так и по организации накопления и считывания информации. Большинство современных ФП имеют несколько параллельно работающих выходов, 2 или более управляемых параметров (время накопления, напряжение смещения на фотодиодах и др.), что определяет требования к быстродействию аппаратуры последующей обработки данных и специальному программному обеспечению.

Разработанный универсальный стенд предназначен для измерения фотоэлектрических параметров ФП, а также для использования в устройствах цифрового моделирования аппаратуры обработки данных с ФП.

Стенд состоит из следующих модулей:

- черное тело (ЧТ) с набором калиброванных, сменных диафрагм;
- скамья оптическая;
- блок формирования сигналов управления (ФСУ);
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ);
- контроллер ввода данных в ПЭВМ;
- специализированное программное обеспечение;
- система охлаждения;

Блок ФСУ обеспечивает работоспособность ФП путем подачи на него постоянных и импульсных электрических напряжений, формируемых под управлением контроллера ввода/вывода данных по командам, поступающим из ПЭВМ. Модуль ФСУ состоит из цифровых резисторов и преобразователей уровней сигналов. Блок АЦП состоит из 14-ти разрядного АЦП. Модуль преобразует напряжения выходных сигналов ФП в цифровую форму с тактовой частотой до 10 МГц. На входе АЦП стоит мультиплексор, что позволяет подавать на вход модуля до 8 аналоговых сигналов. Контроллер ввода данных в ПЭВМ формирует импульсные напряжения сигналов, поступающие в ФСУ, и преобразует 14-ти разрядные данные из блока АЦП в 16-ти разрядные данные (добавляя сигналы синхронизации). Модуль передает данные по интерфейсу USB2.0 в ПЭВМ и обратно со скоростью до 24 Мбайт/сек. Модуль СПО позволяет управлять режимами работы ФСУ (ФП), модулем ввода/вывода данных, и обеспечивает обработку данных в реальном масштабе времени (построение изображения матрицы, построение гистограммы выходных сигналов, расчет основных фотоэлектрических параметров и пр.).

Основные технические характеристики разработанного стенда:

- размах входных аналоговых сигналов – (0-5) В;
- частота дискретизации входного сигнала – 4 МГц (возможно до 10 МГц);
- количество входных каналов – до 8;
- количество регулируемых постоянных напряжений – 4;
- шум с открытым входом (СКО)–0,15 мВ; -скорость цифрового потока– 8 Мб/сек.

## Цифровой кремниевый мультиплексор для многоэлементных ИК ФПУ коротковолнового диапазона

И.И. Ли<sup>1</sup>, Н.В. Гришанов<sup>2</sup>.

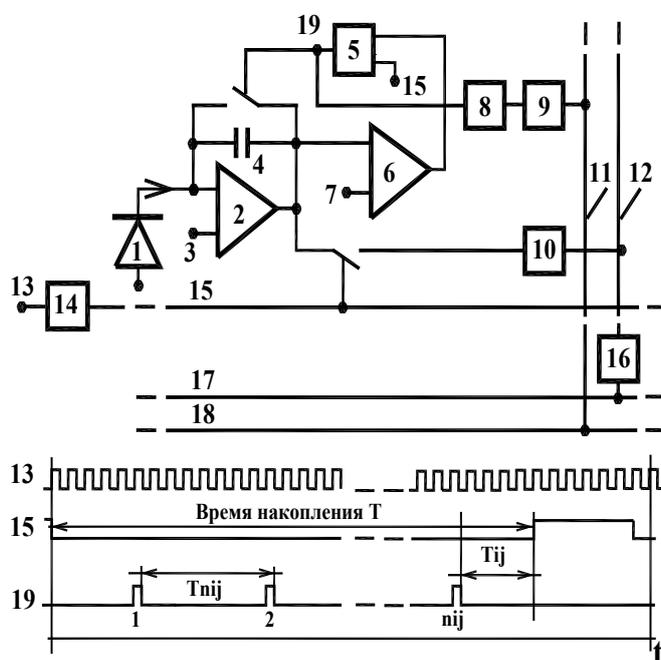
<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева 13.

<sup>2</sup>Новосибирский Государственный технический университет,  
Новосибирск, Новосибирск, 630073, пр. К.Маркса 20.

тел: (383) 330-7781, факс: (383) 330-5256, эл.почта: [irlamlee@isp.nsc.ru](mailto:irlamlee@isp.nsc.ru)

Для третьего поколения ИК ФПУ основной задачей является повышение вероятности обнаружения и идентификации целей, снижение габаритных размеров, потребляемой мощности и стоимости. Решение этих задач требует создание нового поколения цифро-аналоговых устройств считывания с формированием сигналов в цифровой форме на пиксельном уровне [1, 2]. Такие устройства позволяют решить некоторые принципиальные для аналоговых устройств считывания недостатки, например, снять ограничение по зарядовой

емкости устройств считывания для спектрального диапазона 5-12 мкм и, тем самым, поднять более чем в 5 раз температурное разрешение многоэлементных ИК ФПУ [1]. Однако основное преимущество цифро-аналоговых устройств считывания - реализация принципиально новых функциональных возможностей ИК ФПУ. Так в коротковолновом спектральном диапазоне цифровые устройства считывания позволили приступить к разработке ИК лидаров нового поколения на базе многоэлементных ИК ФПУ с возможностью измерения в каждом пикселе расстояния до объектов изображения [3]. В этих ИК ФПУ применяются устройства считывания на основе трансимпедансного усилителя. Нами предлагается представленная на рисунке структурная



турная схема цифрового устройства считывания и временные диаграммы управляющих напряжений, где 1 – фотодиод, 2 – операционный усилитель, 3 – неинвертирующий вход, 4 – емкость, 6 – компаратор, 7 - неинвертирующий вход компаратора, 8 – N разрядный счетчик, 9 – УВХ, 10 – УВХ, 11, 12 - столбцовые шины считывания, 14-логический элемент, 15, 18, строчные шины управления, 16 – столбцовый АЦП.

По шине 11 передается количество циклов  $n_{ij}$  а по шине 12 сигнал в аналоговом виде ( $V_{ij}$ ) с неполного цикла считывания.

### Литература

- [1] E. Borniol, P. Castelein, F. Guellec, *et al.*, Proc. of SPIE, Vol. 8012, 801232, 2011.
- [2] J. Rhee, Y. Joo, Electronics Letters, 2003, V.39, N4, p.360-361.
- [3] И.И. Ли, Успехи прикладной физики, 2014, №4, с.407-412

## Точно решаемая квантовая модель ОПЗ полупроводника

В.Г. Половинкин<sup>1,2</sup>, А.П. Ковчавцев<sup>1</sup>, А.В. Царенко<sup>1</sup>, А.Е. Настовьяк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск 630090, просп. Академика Лаврентьева, 13, Россия

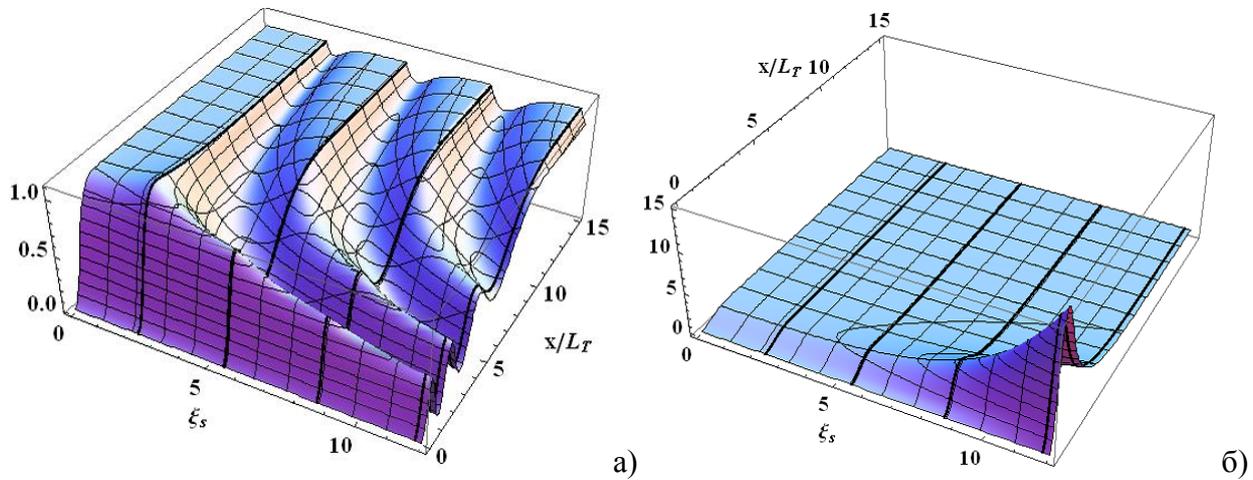
<sup>2</sup> НГТУ, 630073, г. Новосибирск, просп. К.Маркса, 20, Россия

тел: (383)330-90-55, факс: (383)333-27-71, эл. почта: [pvg@isp.nsc.ru](mailto:pvg@isp.nsc.ru)

Квантовомеханическое описание ОПЗ полупроводника проводится, как правило, решением совместным решением уравнений Шредингера и Пуассона. При этом влияние носителей заряда в непрерывном спектре учитывается в классическом или квазиклассическом приближении или вводятся конечные размеры образца.

В данной работе проведен расчет волновых функций и распределений зарядов в приповерхностном слое полубесконечного полупроводника для модельной зависимости потенциала от расстояния:  $V(z) = V_s \exp(-z/L)$ . Выбор такого модельного потенциала обусловлен его качественным подобием реальному потенциалу и существованием точного решения волнового уравнения в таком потенциале. Численные расчеты проводились для области обогащения n-InAs при температуре 77К.

Показано, что в момент образования двумерной подзоны происходит отщепление плотности состояний непрерывного спектра в образующуюся двумерную подзону.



На рисунке показаны зависимости концентраций электронов от расстояния и от величины изгиба зон на поверхности: а) в непрерывном и б) непрерывный + дискретный энергетических спектрах. В непрерывном спектре хорошо видны особенности распределения в момент образования двумерных подзон.

### Литература

[1] А.И.Вейнгер, А.Г.Забродский, Т.В.Тиснек, ФТП **34**, 45 (2000).

[2] Л.В.Келдыш, в кн. *Электронно-дырочные капли в полупроводниках*, под ред. К.Д.Джеффриса и Л.В.Келдыша, Наука, М. 1988, с.7.

## Алфавитный указатель

But D.	30	Астахов В.П.	84, 104, 166
Coquillat D.	30	Атутов С.Н.	145
Cywiński G.	134	Атучин В.В.	122
Dietl T.	134	Аульченко Н.А.	165
Dvoretzky S.A.	134		
Dyakonova N.	30	Баев С.Г.	181
Dzhagan V.M.	71	Баженов Н.Л.	35
Fajgar Radek	76	Базовкин В.М.	49, 50, 176
Ganichev S.D.	30	Бакаров А.К.	63, 65, 66, 93, 126, 127, 133
Grabecki G.	134	Бакин В.В.	85
Huhtio T.	31	Барабаненков М.Ю.	148, 149
Kakko J.P.	31	Баютова О.Р.	127
Кнар W.	30, 134	Бельтюков А.Н.	78, 87
Krishtopenko S.S.	134	Беляков В.А.	25
Lipsanen H.	31	Беспалко Н.И.	155
Majewicz M.	134	Блошкин А.А.	37
Mikhailov N.N.	134	Бобыль А.В.	57
Piotrowski A.	46	Богданов Е.В.	118
Ramana C.V.	122	Боев М.В.	119
Remes Zdenek	76	Бойко А.М.	57
Semenova O.I.	51	Бойко М.Е.	57
Skierbiszewski C.	134	Болтарь К.О.	47, 136, 137
Stuchlik J.	36, 76	Бончик А.Ю.	42
Stuchlikova The Ha	76	Борзов С.М.	86, 171
Sypek M.	30	Борисов Г.М.	67, 151
Терре F.	134	Бородин Д.В.	82, 84, 132, 156, 157, 158, 159, 166
Vergnat M.	36	Бородин М.В.	56
Vitiello M.	30	Брашеван Ю.В.	162
Wróbel J.	134	Брунев Д.В.	22, 117, 132
Yahniuk I.	134	Брунков П.Н.	77
Yeryukov N.A.	51	Булдыгин А.Ф.	177
Zahn D.R.T.	71	Буравлев А.Д.	31
Zhiyong Li	51	Бурлаков И.Д.	19, 47, 137
		Буяло М.С.	55
Абрамкин Д.С.	66, 126, 152		
Агафонов А.Н.	29	Вайнер Б.Г.	168
Азаров И.А.	44, 115	Валеев Р.Г.	78, 87
Акимов А.Н.	108	Валишева Н.А.	48, 49, 93, 133, 145, 162
Акрестина А.С.	56	Варавин В. С.	22, 35, 42, 45, 49, 103, 107, 120, 132, 135, 146, 154
Алантьев Д.В.	167	Варлашов И.Б.	104
Алдохин П.А.	142	Варнаков С.Н.	70
Алёшкин В.Я.	62	Васев А.В.	40, 92
Алтухов А.А.	113, 114	Василенко А.П.	40, 75, 92
Альперович В.Л.	72	Василенко М.А.	94
Андреев А.Ю.	85	Васильев В.В.	22, 49, 50, 82, 84, 132, 138, 146, 156, 157, 166
Андронов А.А.	25, 154	Вдовин В.И.	36
Анисимова Т.И.	158	Ветошкин В.М.	78
Антонов В.А.	64	Викулов А.Г.	85
Аржанников А.В.	88, 180	Винокуров Н.А.	29
Армбристер В.А.	37	Витрик О.Б.	21
Артамонов А.В.	104		
Асрян Л.В.	23		
Астафьев М.А.	181, 182		

Вицина Н.Р.	48	Додин Е.П.	25
Вишняков А.В.	22, 117, 132	Долгих А.В.	85
Владимиров В.М.	75	Долговесов Б.С.	86
Власов П.В.	47	Дубинов А.А.	62
Войцеховский А. В.	39, 42, 99, 135, 139	Дуда Т.А.	71
Волков Н.В.	70	Дулин С.А.	101, 165
Волкова Н.С.	41		
Володин В.А.	36, 43, 74	Егорова С.Г.	34
Володкин Б.О.	29	Ельников Д.С.	158
Волчок Н.Д.	177	Емельянов А.А.	85
Вольхин Ю.Н.	52	Емельянов Е.А.	40, 92, 140
		Ершенко Е.М.	57
Гавриленко В.И.	58, 62	Есаев Д.Г.	48, 81, 112, 160
Гаджиев И.М.	55		
Гайдук А.Е.	38, 95	Жигалов В.С.	97
Гайлес В.М.	49	Журавлев А.Г.	72
Гайслер В.А.	59, 63	Жуков А.Е.	23, 60
Галеева А.В.	34	Журавлев К.С.	93, 96, 121, 133, 150
Галкин К.Н.	76	Журов Г.Е.	83, 174
Галкин Н.Г.	61, 76, 141		
Гамбарян М.П.	36	Завадский Ю.И.	162
Гамзинов С.В.	85	Загубисало П.С.	109, 110
Ганичев С.Д.	34	Задиранов Ю.М.	60
Гапоненко С.В.	26	Залесский В.Б.	98, 123
Генцелев А.В.	181	Зверев А.В.	117, 173
Герасимов В.В.	81	Зинченко Д.И.	25
Гилинский А.М.	96, 121	Злобина Е.А.	38
Гисматулин А.А.	74	Зубавичус Я.В.	57
Гицилевич Я.В.	166	Зубов Ф.И.	23
Голицын А.А.	172		
Голицын А.В.	86, 90, 169, 170, 171	Иванов Е.К.	165
Голубовская Н.О.	102	Иванов И.А.	88
Гольдберг И.И.	85	Иванов С.В.	47
Гольдорт В.Г.	67, 151	Иванов С.Д.	89
Голяшов В.А.	63	Игуменов А.Ю.	97
Горбунов Г.Г.	178	Ижнин И.И.	42
Горошко Д.Л.	141	Ильинская Н.Д.	77
Горшков Д.В.	85, 155	Итальянцев А.Г.	148, 149
Гришанов Н.В.	184	Ищенко Д.В.	108
Гузев А.А.	49, 79, 131		
Гуляев Ю.В.	113, 114	Кадыков А.М.	62
Гутаковский А.К.	40, 61, 66, 75, 92, 126, 141	Калагин А.К.	48
		Камаев Г.Н.	36, 74
Данилов С.Н.	34	Канибер М.	65
Дворецкий С. А.	22, 35, 42, 44, 49, 62, 73, 91, 103, 107, 117, 132, 134, 135, 154, 173	Карандашев С.А.	77
Двуреченский А.В.	36, 37	Каргаполова И.Ю.	28
Демьяненко М.А.	48, 81, 112, 160, 161	Карпов В.В.	80, 84, 104, 166, 183
Деребезов И.А.	63	Карпухина Н.Г.	77
Дерябин А.С.	75	Кесаев С.А.	155
Дзюбина Л.Л.	43	Кеслер В.Г.	79
Дзядух С.М.	135	Кибис О.В.	66, 121
Дмитриев Д.В.	63, 96	Кириенко В.В.	37
Добровольский П.П.	142	Кисель В.Е.	67
		Кислых Н.В.	63
		Кистенева М.Г.	56

Климов А.Э.	33	Левцова Т.А.	93
Князев Б.А.	29, 81, 115	Ледовских Д.В.	67, 151
Ковалёв А.А.	67, 151	Ли И.И.	49, 129, 184
Ковалев В.М.	119	Липовский А.А.	60
Ковчавцев А.П.	49, 79, 131, 133, 138, 185	Лисицын В.М.	56
Кожухов А.В.	121	Лобкин М.В.	155
Кожухов А.С.	93	Лозовой К.А.	99
Козлов А.И.	112, 160, 161	Локтионов В.И.	85
Козырев М.Е.	84, 166	Лопухин А.А.	47
Козырев М.Е.	166	Лошкарев И.Д.	45, 75
Колегов А.А.	56	Лукьяненко А.В.	70
Колесников А.В.	45	Львова Т.В.	47
Колосовский Е.А.	143	Лямкина А.А.	65, 144
Команов А.А.	92	Мазалов А.В.	85
Комиссарова Т.А.	47	Макаров С.Н.	180
Конников С.Г.	57	Макаров Ю.С.	49, 173
Конойко А.И.	98	Маклаков А.М.	158
Конфедератова К.А.	106	Максимов М.В.	23, 60
Коптилов А.В.	63	Малин Т.В.	121, 150
Коротаев А.Г.	42	Мальшев С.А.	53
Косолобов С.Н.	85, 155	Малютина-Бронская В.В.	123
Костюков Е.В.	158	Мансуров В.Г.	121
Костюченко В.Я.	73	Мараховка И.И.	63
Косцов Э.Г.	89, 179	Марин Д.В.	49, 120, 130, 131
Коханенко А.П.	99	Мармалюк А.А.	25, 85
Кочубей В.А.	122	Мартиросов А.В.	183
Кочубей С.А.	36	Маругин А.В.	154
Кошеленко В.Н.	180	Марченко Л.С.	142
Кравченко В.М.	98	Марчишин И.В.	22, 48, 50, 81
Крапивко Е.А.	83	Матвеев Б.А.	77
Кремис И.И.	83	Мелебаев Д.	128
Кривенцов В.В.	87	Мельцер Б.Я.	47
Кривякин Г.К.	36	Мжельский И.В.	129, 176
Кручинин В.Н.	122	Микерин С.Л.	111, 145
Крыжановская Н.В.	23, 60	Микитчук К.Б.	53
Крымко М.М.	162	Милёхин А.Г.	71, 100
Кубарев В.В.	33	Милёхин И.А.	100
Кубашевский Е.П.	118	Минина Н.Я.	118
Кудашова Ю.В.	23, 60	Митасов П.В.	104
Кузнецов Н.С.	80	Михайлов Н.Н.	22, 35, 42, 44, 62, 91, 103, 107, 135, 154
Кузнецов С.А.	32, 71, 88, 100, 109, 163, 164, 180, 181, 182	Михантьев Е.А.	173
Кузьмин В.Д.	44	Михлин Ю.Л.	97
Кулагина М.М.	60	Мищенко Т.О.	41
Кулешов Н.В.	67	Моисеев Э.И.	60
Кулипанов Г.Н.	20, 29	Морозов С.В.	40, 62
Кульчин Ю.Н.	21	Мощенко С.П.	65, 144
Куляхтина Н.М.	136	Мустафин И.А.	31
Кучмижак А.А.	21	Мутилин С.В.	177
Лавров А.А.	77	Мухамметоразова А.Х.	105
Ладенков И.В.	25	Мынбаев К.Д.	35, 42
Ладугин М.А.	25	Назаров Н.И.	165
Латышев А.В.	22, 71, 100	Настовьяк А.Е.	79, 133, 138, 185

Неизвестный И.Г.	94	Протасов Д.Ю.	73, 121
Несмелов С.Н.	135	Пугачёв А.А.	158
Нефёдов С.Г.	124	Путьто М.А.	40, 67, 75, 92, 140, 151
Никитин А.А.	81	Пчеляков О.П.	75, 91, 97, 140
Никифоров А.И.	37, 75		
Никонов А.В.	136, 137	Рауцкий М.В.	70
Новоселов А.Р.	112	Ременный М.А.	77
Ноженко В.Ю.	158	Ремесник В.Г.	103, 107
Ноздрин Ю.Н.	25, 154	Речкунов С.Н.	38, 95
Ноппе М.Г.	153	Родионов А.А.	63
		Родякина Е.Е.	71, 100, 106
Овсюк В.Н.	112, 160, 161	Рожков С.А.	85, 155
Овчинников С.Г.	70	Романов А.С.	72
Окомельков А.В.	154	Рощина Н.И.	158
Орлов Л.К.	41	Рубцова Н.Н.	67, 151
Орлов М.Л.	41	Руденков А.С.	67
Орлова Н.А.	28	Румынин К.М.	66, 126
Осинных И.В.	150	Румянцев В.В.	40, 62
Осипов Ю.В.	82, 84, 156, 157, 158, 159, 166	Рыхлицкий С.В.	44, 91, 101, 115, 122, 162
		Рябова Л.И.	34
Павельев В.С.	29	Рябчёнок В.Ю.	116
Павлов В.В.	124		
Павлюк А.А.	67	Сабина И.В.	22, 45, 49, 50, 132, 138
Павлюк Т.О.	102	Савицкий Г.В.	42
Падалица А.А.	25, 85	Савченко А.П.	48
Панова З.В.	79	Сафронов Л.Н.	64
Парм И.О.	146	Свешникова Л.Л.	71, 100
Паршин А.С.	75, 97	Святошенко Д.Е.	154
Паулиш А.Г.	32, 109, 110, 163	Сейфи Н.А.	170
Паханов Н.А.	75, 140	Селезнёв В.А.	38, 95
Пацин Н.С.	108	Семенов А.Н.	47
Паюсов А.С.	23	Семенов В.И.	84, 166, 183
Пейсахович Ю.Г.	125	Семенова Е.С.	23
Перин А.С.	116	Семченко А.В.	123
Петренко В.И.	84, 166, 183	Семягин Б. Р.	40, 67, 92, 140
Петрушков М.О.	140	Сидоров Г.Ю.	22, 44, 45, 49, 50, 107, 132, 135, 138
Петухов Д.И.	78	Симанчук А.Э.	111, 145
Пилипович В.А.	98	Скипетров Е.П.	34
Писарев Р.В.	124	Скляр В.Ф.	88
Плеханов А.И.	54, 111, 145	Скрылёв А.С.	158, 162
Плюснин В.Ф.	150	Смирнов П.Л.	103
Подкопаев О.И.	102	Соболев В.С.	179
Подлесный С.Н.	64	Сойфер В.А.	29
Покровский Л.Д.	122	Соколов Л.В.	75, 91
Половинкин В.Г.	49, 50, 129, 176, 185	Соловьев В.А.	47
Пономаренко В.П.	19	Сорокин В.А.	145
Попов В. П.	43, 64	Спесивцев Е.В.	44, 91, 101
Портной Е.Л.	55	Степанов С.А.	56
Потатуркин О.И.	86	Стусь Н.М.	77
Предеин А.В.	50, 132, 146	Стучинский В.А.	117
Преображенский В. В.	40, 67, 75, 140, 151, 162	Супрун С.П.	108
Принц В.Я.	38, 95, 177	Сусяков А.О.	132
Прокопьев В.Ю.	115, 165	Сузов Е.В.	80

Тазиев Р.М.	147	Чиков К.Н.	178
Талипов Н.Х.	39, 113, 114, 139	Чистохин И.Б.	40, 63, 162
Тамм М.Е.	34	Чишко В.Ф.	84, 166
Тарасов А.С.	70	Чопорова Ю.Ю.	29, 81, 115
Тептеев А.А.	53	Чукавин А.И.	78, 87
Терехов А.С.	85, 155	Чурилов С.М.	83
Терещенко О.Е.	63	Чучева Г.В.	113, 114
Тимофеев В.А.	37		
Тиходеев С.Г.	69	Шайблер Г.Э.	85, 155
Торопов А.И.	48, 63, 65, 93, 96, 133	Шамирзаев Т.С.	61, 63, 66, 126
Тригуб А.Л.	87	Шандаров В.М.	56, 116
Трифанов А.В.	73	Шандаров С.М.	56
Трошков С.И.	60	Шапиро Б.И.	27
Трунов С.В.	158	Шапор П.И.	83
Труханов Е.М.	45, 75	Шарков М.Д.	57
Трухин В.Н.	31	Шатунов К.П.	83
Тукмаков К.Н.	29	Шварц Н.Л.	94
Тысченко И.Е.	43	Швец В.А.	44, 91, 103, 115
		Шевлягин А.В.	61, 76, 141
Усикова А.А.	77	Шегай О.А.	127
Устинов В.М.	24	Шелковников В.В.	28, 169
		Шепелев В.А.	113
Фадеев М.А.	62	Шерняков Ю.М.	23
Фатеев В.А.	48	Шерстякова В.Н.	108
Федоринин В.Н.	32, 83	Шиманский А.Ф.	102
Феклин Д.И.	75	Шлишевский В.Б.	178
Феклистов К.В.	152	Шрамль К.	65
Фефелов А.Г.	25	Штыгашев А.А.	125
Фещенко В.С.	113	Шуленков А.С.	53
Филатов А.В.	80	Шумский В.Н.	33, 108
Филачев А.М.	19		
Филиппов М.Н.	86	Щеглов Д.В.	93
Финли Д.	65	Щербина В.В.	56
Фицич Е.И.	42		
Фромичев Д.В.	49	Юнусов И.В.	147
Хохлов Д.Р.	34	Якиманский А.В.	111, 145
Хрящев С.В.	167	Якимов А.И.	37
Худякова Е.С.	56	Якимов Е.Б.	121
		Яковкина Л.В.	177
Царев А.В.	68	Яковлева Н.И.	136, 137
Царенко А.В.	49, 79, 131, 133, 138, 185	Якушев М.В.	22, 35, 42, 44, 45, 49, 50, 120, 130, 131, 132, 135
Цивинский М.Ю.	83, 171, 174, 175	Ярошевич А.С.	63
Цырлин Г.Э.	31	Яшина Л.В.	34
Чаплик А.В.	119		
Череменский Ю.М.	158		
Черков А.Г.	36, 43, 74		
Черкова С.Г.	74		
Чернев И.М.	76		
Черничкин В.И.	34		
Чернокожин В.В.	162		
Чиж А.Л.	53		
Чиж К.В.	183		

## Список участников

**Кнар Wojciech**

Charles Coulomb Laboratory,  
CNRS & Montpellier University  
Montpellier, France  
[knar@univ-montp2.fr](mailto:knar@univ-montp2.fr)

**Piotrowski Adam**

VIGO System S.A.  
ul. Poznańska 129/133,  
05-850 Ożarów Mazowiecki  
[apiotrow@vigo.com.pl](mailto:apiotrow@vigo.com.pl)

**Абрамкин Демид Суад**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6945  
[dalamber.07@mail.ru](mailto:dalamber.07@mail.ru)

**Алантьев Дмитрий Владимирович**

Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"  
пр. Ак. Лаврентьева, 2/1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9111  
[alan80@inbox.ru](mailto:alan80@inbox.ru)

**Алферов Жорес Иванович**

Санкт-Петербургский Академический университет –  
научно образовательный центр нанотехнологий РАН  
ул. Хлопина, д. 8, корпус 3,  
Санкт-Петербург, 194021  
[zhores.alfеров@ras.ru](mailto:zhores.alfеров@ras.ru)

**Андронов Александр Александрович**

Институт физики микроструктур РАН  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950,  
(831) 417-9473  
[andron@ipmras.ru](mailto:andron@ipmras.ru)

**Аржаников Андрей Васильевич**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
пр. акад. Лаврентьева, 11,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 329-4589  
[a.v.arzhannikov@inp.nsk.su](mailto:a.v.arzhannikov@inp.nsk.su)

**Артамонов Антон Вячеславович**

ОАО «Швабе–Фотосистемы»  
Днепропетровский пр. 4А, стр. 3А,  
Москва, 117545  
(495) 315-7368  
[art-bass@mail.ru](mailto:art-bass@mail.ru)

**Асеев Александр Леонидович**

Президиум Сибирского отделения РАН  
ул. Лаврентьева, 17,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-0567  
[aseev@sbras.nsc.ru](mailto:aseev@sbras.nsc.ru)

**Бакаров Асхат Климович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6945  
[bakarov@isp.nsc.ru](mailto:bakarov@isp.nsc.ru)

**Балоев Виллен Арнольдович**

ОАО «НПО «Государственный Институт Прикладной Оптики»  
ул. Н. Липатова, д. 2,  
г. Казань, Республика Татарстан, 420075  
(843) 294-8702  
[nrogipo@tnpko.ru](mailto:nrogipo@tnpko.ru)

**Барабаненков Михаил Юрьевич**

Институт проблем технологии микроэлектроники  
и обособленных материалов РАН (ИПТМ РАН)  
ул. Академика Осипьяна, д. 6,  
Черноголовка, Ногинский р-н, Московская обл., 142432  
(496) 524-4062  
[barab@iptm.ru](mailto:barab@iptm.ru)

**Барышников Николай Васильевич**

НИИ Радиоэлектроники и Лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана  
ул. 2-ая Бауманская, д.5, стр. 1,  
Москва, 105005  
(499) 267-6754  
[Baryshnikov@bmstu.ru](mailto:Baryshnikov@bmstu.ru)

**Белоусов Юрий Иванович**

ОАО "Корпорация "Комета"  
ул. Велозаводская, д. 5,  
Москва, 115280

**Бельтюков Артемий Николаевич**

Физико-технический институт УрО РАН  
ул. Кирова, 132, г. Ижевск, 426000  
(341) 243-0163  
[beltukov.a.n@gmail.com](mailto:beltukov.a.n@gmail.com)

**Бетелин Владимир Борисович**

Научно-исследовательский институт  
системных исследований РАН  
Нахимовский просп., 36, к.1,  
Москва, 117218  
[betelin@niisi.msk.ru](mailto:betelin@niisi.msk.ru)

**Бетеров Илья Игоревич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13, г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2408  
[beterov@isp.nsc.ru](mailto:beterov@isp.nsc.ru)

**Блошкин Алексей Александрович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13, г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2832  
[bloshkin@isp.nsc.ru](mailto:bloshkin@isp.nsc.ru)

**Богданов Евгений Владимирович**

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова  
Ленинские горы, 1,  
Москва, 119991  
(495) 939-3941  
[bev@mig.phys.msu.ru](mailto:bev@mig.phys.msu.ru)

**Боголюбов Игорь Александрович**

ОАО "Концерн ПВО "Алмаз-Антей" "ИМПУЛЬС"  
проспект Мира, д. 102,  
Москва, 129626  
[bogolyubov.i.i@mail.ru](mailto:bogolyubov.i.i@mail.ru)

**Боев Максим Вадимович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-3264  
[boevm@isp.nsc.ru](mailto:boevm@isp.nsc.ru)

**Болтарь Константин Олегович**

АО "НПО "Орион"  
ул. Косинская, д. 9,  
Москва, 111538  
(499) 374-9400  
[orion@orion-ir.ru](mailto:orion@orion-ir.ru)

**Борисов Геннадий Михайлович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2769  
[fordifthingbox@gmail.com](mailto:fordifthingbox@gmail.com)

**Бородин Дмитрий Владиленович**

ОАО "НПП "Пульсар"  
Окружной проезд, дом 27, Москва, 105187  
(903) 719-0447  
[dvb1@inbox.ru](mailto:dvb1@inbox.ru)

**Бочкарев Олег Иванович**

Коллегия Военно-промышленной комиссии  
Российской Федерации  
Краснопресненская наб., 2,  
Москва, 103274

**Брыкин Арсений Валерьевич**

ОАО «Российская электроника»  
ул. Космонавта Волкова, д. 12  
Москва, 127299  
[AVBrykin@ruselectronics.ru](mailto:AVBrykin@ruselectronics.ru)

**Бурлаков Игорь Дмитриевич**

АО "НПО "Орион"  
ул. Косинская, д. 9, Москва, 111538  
(499) 374-4900  
[orion@orion-ir.ru](mailto:orion@orion-ir.ru)

**Буюло Михаил Сергеевич**

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Политехническая ул., 26,  
Санкт-Петербург, 194021  
(812) 292-7376  
[mikhail.buyalo@gmail.com](mailto:mikhail.buyalo@gmail.com)

**Вайнер Борис Григорьевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2771  
[bgv@isp.nsc.ru](mailto:bgv@isp.nsc.ru)

**Варавин Василий Семенович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9923  
[varavin@isp.nsc.ru](mailto:varavin@isp.nsc.ru)

**Василенко Максим Анатольевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-1475  
[vasilenkonsk1992@gmail.com](mailto:vasilenkonsk1992@gmail.com)

**Войцеховский Александр Васильевич**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
пр. Ленина, 36,  
г. Томск, 634050  
(382) 241-2772  
[vav43@mail.tsu.ru](mailto:vav43@mail.tsu.ru)

**Волков Никита Валентинович**

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН  
Академгородок, 50,  
г. Красноярск, 660036  
(391) 243-2635  
[volk@iph.krasn.ru](mailto:volk@iph.krasn.ru)

**Володин Владимир Алексеевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2470  
[volodin@isp.nsc.ru](mailto:volodin@isp.nsc.ru)

**Вольхин Юрий Николаевич**

ОАО "Центральное конструкторское бюро автоматики"  
Космический проспект, 24а,  
г. Омск-27, 644027  
(381) 253-7976  
[ckba@omsknet.ru](mailto:ckba@omsknet.ru)

**Гавриленко Владимир Изяславович**

Институт физики микроструктур РАН  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950,  
(831) 417-9462  
[gavr@ipmras.ru](mailto:gavr@ipmras.ru)

**Гайдук Алексей Евгеньевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-0699  
[agff2008@ya.ru](mailto:agff2008@ya.ru)

**Гайлес Владимир Михайлович**

АО НПП "Восток"  
ул. Дуси Ковальчук 27б,  
г. Новосибирск, 630049  
[vostok@online.nsk.su](mailto:vostok@online.nsk.su)

**Гайслер Владимир Анатольевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6945  
[haisler@isp.nsc.ru](mailto:haisler@isp.nsc.ru)

**Гапоненко Сергей Васильевич**

Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси  
пр. Независимости, д. 68,  
г. Минск, 220072, Беларусь  
(517) 284-0448  
[s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by](mailto:s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by)

**Гилинский Александр Михайлович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6945  
[gilinsky@isp.nsc.ru](mailto:gilinsky@isp.nsc.ru)

**Гисматулин Андрей Андреевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-5257  
[anigis@yandex.ru](mailto:anigis@yandex.ru)

**Глухов Александр Викторович**

АО НЗПП с ОКБ  
ул. Дачная, 60,  
г. Новосибирск, 630082  
(383) 225-5641  
[vostok@online.nsk.su](mailto:vostok@online.nsk.su)

**Голицын Александр Андреевич**

Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"  
пр. Ак. Лаврентьева, 2/1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9188  
[aag-09@yandex.ru](mailto:aag-09@yandex.ru)

**Голицын Андрей Вячеславович**

Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"  
пр. Ак. Лаврентьева, 2/1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-1701  
[golitsyn@oesd.ru](mailto:golitsyn@oesd.ru)

**Голубовская Наталия Олеговна**

Сибирский федеральный университет  
пр-т им. газеты Красноярский рабочий, 95,  
г. Красноярск, 660041  
(391) 206-3715  
[nogolubovskaya@gmail.com](mailto:nogolubovskaya@gmail.com)

**Горбунов Георгий Георгиевич**

ОАО «Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова»  
Кадетская линия В. О., д. 5, корп. 2,  
Санкт-Петербург, 199053  
(812) 269-2494  
[ggorbunov@mail.ru](mailto:ggorbunov@mail.ru)

**Горшков Дмитрий Витальевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9874  
[GorshkovDV@isp.nsc.ru](mailto:GorshkovDV@isp.nsc.ru)

**Грибков Виктор Петрович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-1090  
[gribkov@isp.nsc.ru](mailto:gribkov@isp.nsc.ru)

**Гугучкин Валерий Иванович**

ЗАО «Экран — оптические системы»  
ул. Даргомыжского 8а, к. 2,  
г. Новосибирск, 630047  
(383) 325-1725  
[office@ekran-os.ru](mailto:office@ekran-os.ru)

**Гуляев Юрий Васильевич**

Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН  
ул. Моховая 11, корп.7.,  
Москва, 125009  
[gulyaev@cplire.ru](mailto:gulyaev@cplire.ru)

**Дворецкий Сергей Алексеевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-4967  
[dvor@isp.nsc.ru](mailto:dvor@isp.nsc.ru)

**Двуреченский Анатолий Васильевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2466  
[dvurech@isp.nsc.ru](mailto:dvurech@isp.nsc.ru)

**Девяткин Петр Тихонович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9027  
[devyat@isp.nsc.ru](mailto:devyat@isp.nsc.ru)

**Демьяненко Михаил Алексеевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-1957  
[demyanenko@isp.nsc.ru](mailto:demyanenko@isp.nsc.ru)

**Дмитриев Дмитрий Владимирович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6945  
[ddmitriev@isp.nsc.ru](mailto:ddmitriev@isp.nsc.ru)

**Добровольский Петр Порфирьевич**

Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"  
пр. Ак. Лаврентьева, 2/1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9748  
[porfir@ngs.ru](mailto:porfir@ngs.ru)

**Доценко Владимир Викторович**

АО "НПФ "Микран"  
пр. Кирова д. 51Д, г. Томск, 634041  
(382) 241-3403  
[mic@micran.ru](mailto:mic@micran.ru)

**Дулин Сергей Афанасьевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-8716  
[duлин@isp.nsc.ru](mailto:duлин@isp.nsc.ru)

**Егоренко Марина Петровна**

Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
ул. Плахотного, 10,  
г. Новосибирск, 630108  
(383) 343-9111  
[e\\_m\\_p@mail.ru](mailto:e_m_p@mail.ru)

**Емельянов Евгений Александрович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(923) 150-1899  
[e2a@isp.nsc.ru](mailto:e2a@isp.nsc.ru)

**Есаев Дмитрий Георгиевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(913) 753-5407  
[esaev@isp.nsc.ru](mailto:esaev@isp.nsc.ru)

**Жуков Алексей Евгеньевич**

Санкт-Петербургский академический университет —  
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН  
ул. Хлопина, д. 8, корпус 3,  
Санкт-Петербург, 194021  
(812) 448-8594  
[zhukale@gmail.com](mailto:zhukale@gmail.com)

**Журавлев Андрей Григорьевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9874  
[zhuravl@isp.nsc.ru](mailto:zhuravl@isp.nsc.ru)

**Загубисало Петр Станиславович**

Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"  
пр. Ак. Лаврентьева, 2/1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9749  
[peter.zagubisalo@gmail.com](mailto:peter.zagubisalo@gmail.com)

**Зверев Андрей Владимирович**

ОАО «Российская электроника»  
ул. Космонавта Волкова, д. 12  
Москва, 127299

**Звягинцева Полина Александровна**

Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
ул. Плахотного, 10,  
г. Новосибирск, 630108  
(383) 343-9111  
[polinasgugit@mail.ru](mailto:polinasgugit@mail.ru)

**Зоннова Анна Дмитриевна**

Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
ул. Плахотного, 10,  
г. Новосибирск, 630108  
(383) 361-0745  
[annet\\_zonova@mail.ru](mailto:annet_zonova@mail.ru)

**Иванов Владимир Петрович**

ОАО «НПО Государственный институт прикладной оптики»  
ул. Восточная, д. 33б.  
г. Екатеринбург

**Ивонин Иван Варфоломеевич**

Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
пр. Ленина, 36,  
г. Томск, 634050  
(382) 252-9578  
[iiv@phys.tsu.ru](mailto:iiv@phys.tsu.ru)

**Ивченко Евгениус Лемович**

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Политехническая ул., 26,  
Санкт-Петербург, 194021  
[lvchenko@coherent.ioffe.ru](mailto:lvchenko@coherent.ioffe.ru)

**Игуменов Александр Юрьевич**

Сибирский государственный аэрокосмический  
университет имени академика М.Ф. Решетнева  
проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31,  
г. Красноярск, 660037, а\я 1075  
(950) 982-5907  
[igumenovau@mail.ru](mailto:igumenovau@mail.ru)

**Ижнин Игорь Иванович**

Научно-производственное предприятие "Карат"  
ул. Стрийская, 202,  
г. Львов, 79031, Украина  
(032) 263-1065  
[i.izhnin@carat.electron.ua](mailto:i.izhnin@carat.electron.ua)

**Ильина Лариса Александровна**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-3260  
[ilina@isp.nsc.ru](mailto:ilina@isp.nsc.ru)

**Исюк Владимир Ильич**

АО "Новосибирский завод полупроводниковых  
приборов с ОКБ" (АО НЗПП с ОКБ)  
ул. Дачная, 60,  
г. Новосибирск, 630082  
(383) 226-2900  
[secretar@nzpp.ru](mailto:secretar@nzpp.ru)

**Итальянцев Александр Георгиевич**

ОАО "НИИМЭ и Микрон"  
1й Западный пр, д. 12/1,  
Москва, Зеленоград, 124460  
(495) 229-1156  
[aitalyantsev@mikron.ru](mailto:aitalyantsev@mikron.ru)

**Ищенко Денис Вячеславович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-8888  
[ischenkod@isp.nsc.ru](mailto:ischenkod@isp.nsc.ru)

**Каламейцев Александр Владимирович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2488  
[kalam@isp.nsc.ru](mailto:kalam@isp.nsc.ru)

**Камаев Геннадий Николаевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-5257  
[kamaev@isp.nsc.ru](mailto:kamaev@isp.nsc.ru)

**Карпов Владимир Владимирович**  
ОАО «Швабе–Фотосистемы»  
Днепропетровский пр. 4А, стр. 3А,  
Москва, 117545  
(495) 315-7356  
[co-ckb@mail.ru](mailto:co-ckb@mail.ru)

**Кистенева Марина Григорьевна**  
Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники  
пр. Ленина, 40,  
г. Томск, 634050  
(382) 241-3887  
[m-kisteneva@mail.ru](mailto:m-kisteneva@mail.ru)

**Климов Александр Эдуардович**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-7883  
[klimov@isp.nsc.ru](mailto:klimov@isp.nsc.ru)

**Князев Борис Александрович**  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
пр. акад. Лаврентьева, 11,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 329-4839  
[B.A.Knyazev@inp.nsk.su](mailto:B.A.Knyazev@inp.nsk.su)

**Ковчавцев Анатолий Петрович**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-8204  
[kap@isp.nsc.ru](mailto:kap@isp.nsc.ru)

**Козлов Кирилл Владимирович**  
АО "НПО "Орион"  
ул. Косинская, д. 9,  
Москва, 111538  
(495) 373-9400  
[kozlov.k.v@mail.ru](mailto:kozlov.k.v@mail.ru)

**Козлов Александр Иванович**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-1954  
[akozlov@ngs.ru](mailto:akozlov@ngs.ru)

**Колесников Алексей Викторович**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-1089  
[kolesn@isp.nsc.ru](mailto:kolesn@isp.nsc.ru)

**Колосовский Евгений Анатольевич**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-7772  
[kolos@isp.nsc.ru](mailto:kolos@isp.nsc.ru)

**Конойко Алексей Иванович**  
Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси  
пр. Независимости, д. 68,  
г. Минск, 220072, Беларусь  
(517) 281-3229  
[kia54@narod.ru](mailto:kia54@narod.ru)

**Конфедератова Ксения Александровна**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9082  
[kсениya.konfederatova@gmail.com](mailto:kсениya.konfederatova@gmail.com)

**Коротаев Александр Григорьевич**  
Национальный исследовательский Томский  
государственный университет  
пр. Ленина, 36,  
г. Томск, 634050  
(382) 241-2573  
[korotaev@phys.tsu.ru](mailto:korotaev@phys.tsu.ru)

**Корчак Владимир Юрьевич**  
Секция прикладных проблем при Президиуме РАН  
ул. Губкина, д.3,  
Москва, 119333

**Косцов Эдуард Геннадьевич**  
Институт автоматизации и электротехники СО РАН  
пр. Академика Коптюга, д. 1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-7986  
[Kostsov@iae.nsk.su](mailto:Kostsov@iae.nsk.su)

**Котюков Михаил Михайлович**  
ФАНО России  
Ленинский проспект, 32а,  
Москва, 119334

**Крайлюк Анатолий Дмитриевич**  
АО "Концерн радостроения "Вега"  
Кутузовский пр-т, 34,  
Москва, 121170  
(499) 753-4004  
[mail@vega.su](mailto:mail@vega.su)

**Красильник Захарий Фишелевич**  
Институт физики микроструктур РАН  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950  
[zfk@ipmras.ru](mailto:zfk@ipmras.ru)

**Красников Геннадий Яковлевич**  
ОАО "НИИМЭ и Микрон"  
1-ый Западный проезд, д. 12/1,  
Москва, Зеленоград, 124460

**Кручинин Владимир Николаевич**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-8946  
[kruch@isp.nsc.ru](mailto:kruch@isp.nsc.ru)

**Крыжановская Наталья Владимировна**  
Санкт-Петербургский академический университет —  
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН  
ул. Хлопина, д. 8, корпус 3,  
Санкт-Петербург, 194021  
(921) 330-1692  
[kryj@mail.ioffe.ru](mailto:kryj@mail.ioffe.ru)

**Кузнецов Сергей Александрович**  
Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, д. 2,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 363-4295  
[SAKuznetsov@nsm.nsu.ru](mailto:SAKuznetsov@nsm.nsu.ru)

**Кукушкин Игорь Владимирович**  
Институт физики твердого тела РАН  
ул. Академика Осипьяна д.2,  
г. Черноголовка, Московская обл., 142432  
[kukush@issp.ac.ru](mailto:kukush@issp.ac.ru)

**Кулипанов Геннадий Николаевич**  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
пр. акад. Лаврентьева, 11,  
г. Новосибирск, 630090  
[G.N.Kulipanov@inp.nsk.su](mailto:G.N.Kulipanov@inp.nsk.su)

**Кульчин Юрий Николаевич**  
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН  
ул. Радио, 5,  
г. Владивосток, 690041  
(423) 231-0439  
[kulchin@iacp.dvo.ru](mailto:kulchin@iacp.dvo.ru)

**Куляхтина Надежда Михайловна**  
АО "НПО "Орион"  
ул. Косинская, д. 9,  
Москва, 111538  
(499) 374-4900  
[orion@orion-ir.ru](mailto:orion@orion-ir.ru)

**Латышев Александр Васильевич**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9055  
[latyshev@isp.nsc.ru](mailto:latyshev@isp.nsc.ru)

**Ледовских Дмитрий Васильевич**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2769  
[dvledovskikh@isp.nsc.ru](mailto:dvledovskikh@isp.nsc.ru)

**Ли Ирлам Игнатьевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-7781  
[irlamlee@isp.nsc.ru](mailto:irlamlee@isp.nsc.ru)

**Лозовой Кирилл Александрович**

Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
пр. Ленина, 36,  
г. Томск, 634050  
(382) 241-3517  
[lka@sibmail.com](mailto:lka@sibmail.com)

**Локтионов Владимир Ильич**

ОАО "Катод"  
ул. Падунская, 3,  
г. Новосибирск, 630047  
(383) 227-2200  
[info@katodnv.com](mailto:info@katodnv.com)

**Лямкина Анна Алексеевна**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6945  
[lyamkina@isp.nsc.ru](mailto:lyamkina@isp.nsc.ru)

**Макаров Юрий Сергеевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(923) 134-6760  
[makarov@isp.nsc.ru](mailto:makarov@isp.nsc.ru)

**Макарова Диана Георгиевна**

Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
ул. Плахотного, 10,  
г. Новосибирск, 630108  
(383) 343-9111  
[diana\\_ssga@mail.ru](mailto:diana_ssga@mail.ru)

**Максин Сергей Валерьевич**

АО "Швабе"  
Восточная ул., 33Б,  
г. Екатеринбург, 620100  
(343) 311-2101  
[mail@shvabe.com](mailto:mail@shvabe.com)

**Малышев Сергей Александрович**

Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси  
пр. Независимости, д. 68,  
г. Минск, 220072, Беларусь  
(017) 281-2213  
[malyshev@ieee.org](mailto:malyshev@ieee.org)

**Мальцев Андрей Иванович**

ОАО "Концерн ПВО "Алмаз-Антей" "ИМПУЛЬС"  
проспект Мира, д. 102,  
Москва, 129626  
(499) 608-1870  
[maltsev\\_ai@impuls.ru](mailto:maltsev_ai@impuls.ru)

**Малютина-Бронская Виктория Владимировна**

Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси  
пр. Независимости, д. 68,  
г. Минск, 220072, Беларусь  
(517) 281-3229  
[v\\_malyutina@rambler.ru](mailto:v_malyutina@rambler.ru)

**Мантуров Денис Валентинович**

Минпромторг  
Китайгородский проезд, дом 7,  
г. Москва, 109074

**Марин Денис Викторович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-5501  
[marin@isp.nsc.ru](mailto:marin@isp.nsc.ru)

**Матвеев Борис Анатольевич**

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Политехническая ул., 26,  
Санкт-Петербург, 194021  
(812) 292-7955  
[bmat@iropt3.ioffe.ru](mailto:bmat@iropt3.ioffe.ru)

**Мелебаев Даулбай**

Институт солнечной энергии АН Туркменистана  
проспект Сапармурат Туркменбаши, 31,  
г. Ашхабад, Туркменистан, 744000  
(931) 294-6597  
[dmelebay@yandex.ru](mailto:dmelebay@yandex.ru)

**Мжельский Иван Викторович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-7781  
[miv@isp.nsc.ru](mailto:miv@isp.nsc.ru)

**Мизеров Михаил Николаевич**

Научно-технологический центр микроэлектроники  
и субмикронных гетероструктур РАН  
Политехническая улица, д. 26,  
г. Санкт-Петербург, 194021

**Микерин Сергей Львович**

Институт автоматки и электрометрии СО РАН  
пр. Академика Коптюга, д. 1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6655  
[mikerin@iae.sbras.ru](mailto:mikerin@iae.sbras.ru)

**Милёхин Илья Александрович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 316-6054  
[mia2994@gmail.com](mailto:mia2994@gmail.com)

**Милёхин Александр Германович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 316-6054  
[milekhin@isp.nsc.ru](mailto:milekhin@isp.nsc.ru)

**Мисник Виктор Порфирьевич**

ФГУП «ЦНИИ «Комета»  
ул. Велозаводская, д. 5,  
115280, г. Москва

**Михайлов Николай Николаевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13, г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-4967  
[mikhailov@isp.nsc.ru](mailto:mikhailov@isp.nsc.ru)

**Морозов Сергей Вячеславович**

Институт физики микроструктур РАН  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950,  
(831) 417-9473  
[more@ipmras.ru](mailto:more@ipmras.ru)

**Мутилин Сергей Владимирович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-0699  
[mutilin@isp.nsc.ru](mailto:mutilin@isp.nsc.ru)

**Мухаммедоразовна Алтынгозел Ходжадурдыевна**

Институт солнечной энергии АН Туркменистана  
проспект Сапармурат Туркменбаши, 31,  
г. Ашхабад, Туркменистан, 744000  
(931) 294-6597  
[aurum-au@mail.ru](mailto:aurum-au@mail.ru)

**Мынбаев Карим Джафарович**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский  
университет информационных технологий, механики и оптики  
Кронверкский пр., д.49,  
Санкт-Петербург, 197101  
(921) 753-6582  
[mynkad@mail.ioffe.ru](mailto:mynkad@mail.ioffe.ru)

**Настовьяк Артём Евгеньевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(913) 726-2280  
[nae@isp.nsc.ru](mailto:nae@isp.nsc.ru)

**Неизвестный Игорь Георгиевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2466  
[neizv@isp.nsc.ru](mailto:neizv@isp.nsc.ru)

**Несмелов Сергей Николаевич**

Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
пр. Ленина, 36,  
г. Томск, 634050  
(382) 241-2772  
[nesm69@mail.ru](mailto:nesm69@mail.ru)

**Нефёдов Сергей Геннадьевич**

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Политехническая ул., 26,  
Санкт-Петербург, 194021  
(812) 297-2245  
[nefedov@mail.ioffe.ru](mailto:nefedov@mail.ioffe.ru)

**Нечаев Андрей Юрьевич**

ФКУ НПО "СТИС" МВД России  
ул. Пруд Ключики, 2,  
Москва, 111024

**Никитов Сергей Аполлонович**

Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН  
ул. Моховая 11, корп.7.,  
Москва, 125009  
[nikitov@cplire.ru](mailto:nikitov@cplire.ru)

**Никонов Антон Викторович**

АО "НПО "Орион"  
ул. Косинская, д. 9,  
Москва, 111538  
(499) 374-4900  
[ech@li.ru](mailto:ech@li.ru)

**Новоселов Андрей Рудольфович**

Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"  
пр. Ак. Лаврентьева, 2/1, г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-7421  
[novoselov@oesd.ru](mailto:novoselov@oesd.ru)

**Ноппе Михаил Гершевич**

Новосибирский государственный технический университет  
пр-т К.Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073  
(383) 223-7948  
[noppe@ieeee.org](mailto:noppe@ieeee.org)

**Овсяк Виктор Николаевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13, г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6858  
[acelle@isp.nsc.ru](mailto:acelle@isp.nsc.ru)

**Орликовский Александр Александрович**

Физико-технологический институт РАН  
Нахимовский проспект, 36/1,  
Москва, 117218  
[orlikovsky@ftian.ru](mailto:orlikovsky@ftian.ru)

**Орлов Лев Константинович**

Институт физики микроструктур РАН  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950,  
(831) 460-1931  
[orlov@ipm.sci-nnov.ru](mailto:orlov@ipm.sci-nnov.ru)

**Осинных Игорь Васильевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-4475  
[igor-osinnykh@isp.nsc.ru](mailto:igor-osinnykh@isp.nsc.ru)

**Павельев Владимир Сергеевич**

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П. Королёва  
Московское шоссе, 34,  
г. Самара, 443086  
(846) 267-4843  
[pavelyev10@mail.ru](mailto:pavelyev10@mail.ru)

**Парм Игорь Оскарович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6944  
[parm59@ngs.ru](mailto:parm59@ngs.ru)

**Пархоменко Юрий Николаевич**

АО «Гиредмет»  
Б.Толмачевский пер., дом 5, стр. 1,  
Москва, 119017  
[pyn@giredmet.ru](mailto:pyn@giredmet.ru)

**Паршин Анатолий Сергеевич**

Сибирский государственный аэрокосмический  
университет имени академика М.Ф. Решетнева  
проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31,  
г. Красноярск, 660037, а\я 1075  
(391) 264-0180  
[aparshin@sibsau.ru](mailto:aparshin@sibsau.ru)

**Паулиш Андрей Георгиевич**

Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"  
пр. Ак. Лаврентьева, 2/1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 316-5910  
[paulish63@ngs.ru](mailto:paulish63@ngs.ru)

**Пейсахович Юрий Григорьевич**

Новосибирский государственный технический университет  
пр-т К.Маркса, 20,  
г. Новосибирск, 630073  
(913) 396-9257  
[peisakhovich@corp.nstu.ru](mailto:peisakhovich@corp.nstu.ru)

**Перин Антон Сергеевич**

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
пр. Ленина, 40,  
г. Томск, 634050  
(382) 270-1518  
[perinas@bk.ru](mailto:perinas@bk.ru)

**Петрушков Михаил Олегович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-1967  
[Maikdi@mail.ru](mailto:Maikdi@mail.ru)

**Плеханов Александр Иванович**

Институт автоматки и электрометрии СО РАН  
пр. Академика Коптюга, д. 1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-3174  
[fractal@iae.nsk.ru](mailto:fractal@iae.nsk.ru)

**Подкопаев Олег Иванович**

АО «Германий»  
Транспортный проезд, 1,  
г. Красноярск, 660027  
(391) 262-9296  
[shimanaf@mail.ru](mailto:shimanaf@mail.ru)

**Половинкин Владимир Григорьевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-8204  
[pvg@isp.nsc.ru](mailto:pvg@isp.nsc.ru)

**Пономаренко Владимир Павлович**

АО "НПО "Орион"  
ул. Косинская, д. 9,  
Москва, 111538  
(499) 374-9400  
[orion@orion-ir.ru](mailto:orion@orion-ir.ru)

**Попов Владимир Павлович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2493  
[popov@isp.nsc.ru](mailto:popov@isp.nsc.ru)

**Потапов Александр Валерьевич**

Минпромторг  
Китайгородский проезд, дом 7,  
Москва, 109074

**Потатуркин Олег Иосифович**

Институт автоматки и электрометрии СО РАН  
пр. Академика Коптюга, д. 1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-4020  
[potaturkin@iae.nsk.ru](mailto:potaturkin@iae.nsk.ru)

**Преображенский Валерий Владимирович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-1967  
[pvv@isp.nsc.ru](mailto:pvv@isp.nsc.ru)

**Принц Виктор Яковлевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-5636  
[prinz@isp.nsc.ru](mailto:prinz@isp.nsc.ru)

**Путьто Михаил Альбертович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-1967  
[puma@isp.nsc.ru](mailto:puma@isp.nsc.ru)

**Пчеляков Олег Петрович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2322  
[pch@isp.nsc.ru](mailto:pch@isp.nsc.ru)

**Ракович Николай Степанович**

АО "Швабе"  
Восточная ул., 33Б,  
г. Екатеринбург, 620100  
(343) 311-2101  
[mail@shvabe.com](mailto:mail@shvabe.com)

**Рассохин Василий Андреевич**

АО «Швабе – Оборона и Защита»  
ул. Дуси Ковальчук, 179/2  
г. Новосибирск, 630049  
(383) 216-0788  
[post@tochpribor.com](mailto:post@tochpribor.com)

**Ромасько Светлана Владимировна**

Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
ул. Плахотного, 10,  
г. Новосибирск, 630108  
(383) 361-0745  
[s\\_romasko@mail.ru](mailto:s_romasko@mail.ru)

**Рубцова Наталия Николаевна**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2769  
[rubtsova@isp.nsc.ru](mailto:rubtsova@isp.nsc.ru)

**Румынин Кирилл Михайлович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6945  
[kup9tko@ya.ru](mailto:kup9tko@ya.ru)

**Рыхлицкий Сергей Владимирович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-8946  
[rhl@isp.nsc.ru](mailto:rhl@isp.nsc.ru)

**Рябцев Игорь Ильич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2408  
[ryabtsev@isp.nsc.ru](mailto:ryabtsev@isp.nsc.ru)

**Салихов Сергей Владимирович**

Министерство науки и образования РФ  
ул. Тверская, дом 11, ГСП-3,  
Москва, 125993

**Сауров Александр Николаевич**

НПК "Технологический центр"  
проезд 4806, д.5,  
Москва, Зеленоград, 124498

**Сафронов Иван Юрьевич**

АО "Интек Аналитика"  
ул. Оптиков, д. 4, корп. 2, лит. А, офис 209,  
Санкт-Петербург, 197374  
(383) 328-1367  
[info@intech-group.ru](mailto:info@intech-group.ru)

**Семенова Ольга Ивановна**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-8591  
[oisem@isp.nsc.ru](mailto:oisem@isp.nsc.ru)

**Сибельдин Николай Николаевич**

Физический институт  
им. П.Н. Лебедева РАН  
Ленинский проспект, д.53  
Москва, 119991 ГСП-1  
[sibeldin@sci.lebedev.ru](mailto:sibeldin@sci.lebedev.ru)

**Сигов Александр Сергеевич**

МГТУ МИРЭА  
проспект Вернадского, дом 78,  
Москва, 119454  
[sigov@mirea.ru](mailto:sigov@mirea.ru)

**Сидоров Юрий Георгиевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-3283  
[sidorov@isp.nsc.ru](mailto:sidorov@isp.nsc.ru)

**Сидоров Георгий Юрьевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2965  
[george@isp.nsc.ru](mailto:george@isp.nsc.ru)

**Сизов Федор Федорович**

Институт физики полупроводников  
им. В.Е. Лашкарева НАН Украины  
пр-т Науки, 41,  
г. Киев, 03028, Украина  
[sizov@isp.kiev.ua](mailto:sizov@isp.kiev.ua)

**Симанчук Андрей Эдуардович**

Институт автоматки и электрометрии СО РАН  
пр. Академика Коптюга, д. 1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-3174  
[simmk@yandex.ru](mailto:simmk@yandex.ru)

**Скубневский Эдуард Владимирович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2772  
[skub@isp.isp.ru](mailto:skub@isp.isp.ru)

**Слободчиков Владимир Николаевич**

АО НПО «Высокоточные комплексы»  
Управляющему директору  
ОАО «КБточмаш им. А.Э. Нудельмана»  
ул. Введенского, д. 8,  
Москва, 117342

**Солдатенков Виктор Акильдиевич**

Федеральный научно-производственный  
центр "НПО Геофизика-НВ"  
ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2,  
Москва, 107076

**Спесивцев Евгений Васильевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-8716  
[evs@isp.nsc.ru](mailto:evs@isp.nsc.ru)

**Стучинский Виктор Андреевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2276  
[stuchin@isp.nsc.ru](mailto:stuchin@isp.nsc.ru)

**Сусов Евгений Васильевич**  
ОАО «Швабе–Фотосистемы»  
Днепропетровский пр. 4А, стр. 3А,  
Москва, 117545  
(495) 313-3487  
[otdel212@mail.ru](mailto:otdel212@mail.ru)

Тазиев Ринат Миргазиянович  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6578  
[taziev@isp.nsc.ru](mailto:taziev@isp.nsc.ru)

**Талипов Нияз Хатимович**  
Фрязинский филиал Института радиотехники и  
электроники им. В. А. Котельникова РАН  
пл. Введенского, д. 1,  
г. Фрязино Московской области, 141190  
(926) 246-5396  
[nivazt@yandex.ru](mailto:nivazt@yandex.ru)

**Тарасов Александр Петрович**  
ОАО "Красногорский завод им. С.А.Зверева"  
ул. Речная, д. 8,  
г. Красногорск, Московская обл., 143403

**Тарасов Виктор Васильевич**  
ОАО Центральный научно-  
исследовательский институт «Циклон»  
Щёлковское шоссе, дом 77,  
Москва, 107497

**Терехов Александр Сергеевич**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-8508  
[terek@isp.nsc.ru](mailto:terek@isp.nsc.ru)

**Терещенко Олег Евгеньевич**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-4475  
[teresh@isp.nsc.ru](mailto:teresh@isp.nsc.ru)

**Тиходеев Сергей Григорьевич**  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
ул. Вавилова, 38,  
Москва, 119991  
(499) 503-8102  
[tikh@gpi.ru](mailto:tikh@gpi.ru)

**Торопов Александр Иванович**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6945  
[toropov@isp.nsc.ru](mailto:toropov@isp.nsc.ru)

**Трифанов Александр Владимирович**  
Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
ул. Плеханова, 10,  
г.Новосибирск, 630108  
(383) 361-0745  
[trifanov.alex@mail.ru](mailto:trifanov.alex@mail.ru)

**Трухин Валерий Николаевич**  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Политехническая ул., 26,  
Санкт-Петербург, 194021  
(812) 292-7936  
[valera.truchin@mail.ioffe.ru](mailto:valera.truchin@mail.ioffe.ru)

Тыщенко Ида Евгеньевна  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2493  
[tys@isp.nsc.ru](mailto:tys@isp.nsc.ru)

**Устинов Виктор Михайлович**  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Политехническая ул., 26,  
Санкт-Петербург, 194021  
(812) 297-3178  
[vmust@beam.ioffe.ru](mailto:vmust@beam.ioffe.ru)

**Федорин Виктор Николаевич**  
Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"  
пр. Ак. Лаврентьева, 2/1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9630  
[oos@oesd.ru](mailto:oos@oesd.ru)

**Федорук Михаил Петрович**  
Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, д. 2,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-3244  
[rector@nsu.ru](mailto:rector@nsu.ru)

**Феклистов Константин Викторович**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-2537  
[kos@isp.nsc.ru](mailto:kos@isp.nsc.ru)

**Филачев Анатолий Михайлович**  
АО "НПО "Орион"  
ул. Косинская, д. 9, Москва, 111538  
(499) 374-9400  
[orion@orion-ir.ru](mailto:orion@orion-ir.ru)

**Хохлов Дмитрий Ремович**  
Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова  
Ленинские горы, 1,  
Москва, 119991  
(495) 939-1151  
[khokhlov@mig.phys.msu.ru](mailto:khokhlov@mig.phys.msu.ru)

**Хохлов Сергей Владимирович**  
Минпромторг  
Китайгородский проезд, дом 7,  
Москва, 109074

**Царев Андрей Владимирович**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13, г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6578  
[tsarev@isp.nsc.ru](mailto:tsarev@isp.nsc.ru)

**Цивинский Михаил Юрьевич**  
Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"  
пр. Ак. Лаврентьева, 2/1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9106  
[m\\_tsiv@mail.ru](mailto:m_tsiv@mail.ru)

**Чаплик Александр Владимирович**  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 333-3264  
[chaplik@isp.nsc.ru](mailto:chaplik@isp.nsc.ru)

**Чернев Игорь Михайлович**  
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН  
ул. Радио, 5,  
г. Владивосток, 690041  
(423) 231-0439  
[igor\\_chernev7@mail.ru](mailto:igor_chernev7@mail.ru)

**Чесноков Дмитрий Владимирович**  
Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
ул. Плеханова, 10,  
г.Новосибирск, 630108  
(903) 998-4961  
[d.v.chesnokov@ssga.ru](mailto:d.v.chesnokov@ssga.ru)

**Чиж Кирилл Всеволодович**  
ОАО «Швабе–Фотосистемы»  
Днепропетровский пр. 4А, стр. 3А,  
Москва, 117545  
(495) 315-7356  
[ko-ckb@mail.ru](mailto:ko-ckb@mail.ru)

**Чиков Константин Никитич**  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский  
университет информационных технологий, механики и оптики»  
Кронверкский пр., д. 49,  
Санкт-Петербург, 197101  
(812) 232-1401  
[otzi@mail.ifmo.ru](mailto:otzi@mail.ifmo.ru)

**Чистохин Игорь Борисович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13, г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9149  
[igor@isp.nsc.ru](mailto:igor@isp.nsc.ru)

**Чишко Владимир Федорович**

ОАО «Швабе–Фотосистемы»  
Днепропетровский пр. 4А, стр. 3А,  
Москва, 117545  
(495) 315-7360  
[otdel212@mail.ru](mailto:otdel212@mail.ru)

**Чукавин Андрей Игоревич**

Физико-технический институт УрО РАН  
ул. Кирова, 132, г. Ижевск, 426000  
(963) 541-1007  
[andrey\\_chukawin@mail.ru](mailto:andrey_chukawin@mail.ru)

Шабурова Аэлиа Владимировна  
Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
ул. Плахотного, 10,  
г.Новосибирск, 630108  
(383) 344-4058  
[inst.oot@snga.ru](mailto:inst.oot@snga.ru)

**Шалагин Анатолий Михайлович**

Институт автоматизации и электротехники СО РАН  
пр. Академика Коптюга, д. 1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-7969  
[shalagin@iae.nsk.su](mailto:shalagin@iae.nsk.su)

**Шарков Михаил Дмитриевич**

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Политехническая ул., 26,  
Санкт-Петербург, 194021  
(812) 292-7985  
[mischar@mail.ioffe.ru](mailto:mischar@mail.ioffe.ru)

**Швец Василий Александрович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(913) 956-1324  
[shvets@isp.nsc.ru](mailto:shvets@isp.nsc.ru)

**Шевлягин Александр Владимирович**

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН  
ул. Радио, 5,  
г. Владивосток, 690041  
(994) 004-6292  
[shevliagin@mail.ru](mailto:shevliagin@mail.ru)

**Шегай Олег Александрович**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-6733  
[shagai@isp.nsc.ru](mailto:shagai@isp.nsc.ru)

**Шелковников Владимир Владимирович**

Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова  
СО РАН  
проспект Академика Лаврентьева, д.9,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-8867  
[vsh@nioch.nsc.ru](mailto:vsh@nioch.nsc.ru)

**Шиманский Александр Федорович**

Сибирский федеральный университет  
пр-т им. газеты Красноярский рабочий, 95, г. Красноярск, 660041  
(391) 206-3715  
[shimanaf@mail.ru](mailto:shimanaf@mail.ru)

**Шлишевский Виктор Брунович**

Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"  
пр. Ак. Лаврентьева, 2/1,  
г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-9106  
[svb\\_dom@ngs.ru](mailto:svb_dom@ngs.ru)

**Штыгашев Александр Анатольевич**

Новосибирский государственный технический университет  
пр-т К.Маркса, 20,  
г. Новосибирск, 630073  
(383) 346-0868  
[shtygashev@corp.nstu.ru](mailto:shtygashev@corp.nstu.ru)

**Якушев Максим Витальевич**

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
ул. Лаврентьева, 13, г. Новосибирск, 630090  
(383) 330-5501  
[yakushev@isp.nsc.ru](mailto:yakushev@isp.nsc.ru)