

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
им. Н. П. Огарёва  
Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН  
Научный центр волоконной оптики РАН  
Институт химии высокочистых веществ РАН  
Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского  
АУ «Технопарк-Мордовия»  
Российский фонд фундаментальных исследований  
Фонд инфраструктурных и образовательных программ ОАО РОСНАНО

**МАТЕРИАЛЫ  
НАНО-, МИКРО-, ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ  
И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ:  
ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
И ПРИМЕНЕНИЕ**

СБОРНИК ТРУДОВ  
13-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ

Саранск, 7–10 октября 2014 г.

Саранск  
Издательство Мордовского университета  
2014

УДК 537.533.3:621.3.049.77

ББК В3

М341

Редакционная коллегия:

*Нищев К. Н. (отв. ред.), Рябочкина П. А. (отв. секр.),*

*Попова М. Н., Маргулис В. А., Чупрунов Е. В.*

М341

**Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение** : сб. тр. 13-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 7–10 окт. 2014 г. / редкол.: К. Н. Нищев (отв. ред.) [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – 180 с.  
ISBN 978-5-7103-2970-2

В сборник трудов включены конспекты лекций и тезисы докладов 13-й Международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение», посвященные актуальным проблемам современного физического материаловедения. Рецензирование докладов осуществлено программным комитетом школы.

УДК 537.533.3:621.3.049.77

ББК В3

ISBN978-5-7103-2970-2

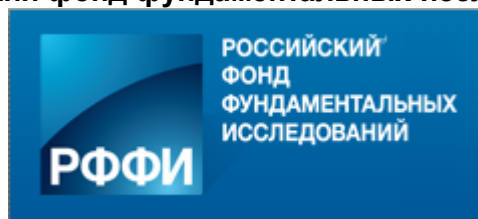
© Коллектив авторов, 2014

© Оформление. Издательство

Мордовского университета, 2014

## Спонсоры и партнеры

### Российский фонд фундаментальных исследований



**Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)** создан Указом Президента Российской Федерации № 426 от 27 апреля 1992 года по инициативе крупнейших ученых страны. Российский фонд фундаментальных исследований – самоуправляемая государственная некоммерческая организация в форме федерального учреждения, находящегося в ведении Правительства Российской Федерации, основной целью которой является поддержка научно-исследовательских работ по всем направлениям фундаментальной науки на конкурсной основе, и которая призвана построить новые отношения между учеными и государством.

Основная задача Фонда в соответствии с Уставом – это проведение конкурсного отбора лучших научных проектов из числа тех, что представлены Фонду учеными в инициативном порядке, и последующее организационно-финансовое обеспечение поддержанных проектов.

К настоящему времени в структуре деятельности РФФИ можно выделить следующие основные направления:

- проведение конкурсного отбора лучших научных проектов из числа тех, что представлены Фонду учеными в инициативном порядке, и последующее организационно-финансовое обеспечение поддержанных проектов;
- обобщение результатов завершенных проектов РФФИ;
- мониторинг науки – многоаспектный анализ состояния и тенденций развития комплекса российской науки на основе оригинальной системы конкурсных индикаторов, экспертных и других данных о ходе выполнения проектов;
- доведение результатов исследований, поддержанных Фондом, до потенциальных пользователей;
- программы общего назначения.

### Фонд инфраструктурных и образовательных программ



**Фонд инфраструктурных и образовательных программ** создан в 2010 году в соответствии с Федеральным законом № 211-ФЗ «О реорганизации Российской корпорации нанотехнологий». Одобренная в ноябре 2013 года «Стратегия Фонда инфраструктурных и образовательных программ» определяет его место в Группе

РОСНАНО как института, способствующего развитию инфраструктуры в сфере нанотехнологий для всех российских предприятий nanoиндустрии, исключая портфельные компании РОСНАНО. Кроме того, Фонд является частью системы российских институтов развития («инновационного лифта»), формируемой в рамках государственной программы «Экономическое развитие и инновационная экономика».

В целях создания оптимальных условий для развития nanoиндустрии Фонд инфраструктурных и образовательных программ ведет работу в семи основных направлениях:

- развитие технологической инфраструктуры;
- создание кадрового потенциала отрасли;
- развитие рынков инновационной продукции;
- стандартизация, сертификация и оценка безопасности нанотехнологической продукции;
- метрологическое обеспечение nanoиндустрии;
- совершенствование законодательства в области инноваций;
- популяризация нанотехнологий.

### Журнал «Фотоника»



Журнал «Фотоника» посвящен оптическим системам любого типа (электрооптическим, оптоволоконным, лазерным, полностью оптическим), их элементам и технологиям. Цель издания – глубокое и подробное освещение вопросов, связанных с оптическими системами передачи, оптическими технологиями, оптическими материалами и элементами, оборудованием и станками, используемыми в оптических системах.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ</b>	20
<b>Лекции</b>	
<b><u>А.В. Наумов</u></b>	21
Институт спектроскопии РАН, Троицк (Москва) Московский Педагогический Государственный Университет, Москва <b>СПЕКТРОМИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ МОЛЕКУЛ И КВАНТОВЫХ ТОЧЕК: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ</b>	
<b><u>Д.А. Горин</u></b>	27
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов <b>ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОБЪЕКТЫ ДЛЯ ТЕРАНОСТИКИ</b>	
<b><u>В.И. Кочубей, Е.К. Волкова, Ю.Г. Конюхова</u></b>	31
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов <b>СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ПОЛИМЕРЕ</b>	
<b><u>Е.С. Климов<sup>1</sup>, А.М. Обьедков<sup>2</sup>, Б.С. Каверин<sup>2</sup></u></b>	34
<sup>1</sup> Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск <sup>2</sup> Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Нижний Новгород <b>УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ: ИСТОРИЯ, СИНТЕЗ, СТРОЕНИЕ, НОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b>	
<b>Доклады</b>	
<b><u>Д.А. Грачев, А.В. Ершов, А.В. Пирогов, Д.А. Павлов</u></b>	42
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>НАНОКРИСТАЛЛЫ Ge В МАТРИЦАХ SiO<sub>2</sub> И Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ПОЛУЧЕННЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ОТЖИГОМ: ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА</b>	
<b><u>Д.С. Королев, А.Е. Смирнов, А.Н. Михайлов, А.И. Белов,</u></b>	43
<b><u>А.Н. Шушунов, Д.И. Тетельбаум</u></b>	
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>ДИСЛОКАЦИОННАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В КРЕМНИИ: ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ БОРОМ И АТМОСФЕРЫ ОТЖИГА</b>	
<b><u>Н.А. Бунаков<sup>1</sup>, С.Н. Потапов<sup>2</sup>, Д.В. Козлов<sup>1</sup></u></b>	44
<sup>1</sup> Ульяновский государственный университет, Ульяновск <sup>2</sup> ООО НПП "Металл-композит", Ульяновск <b>МЕХАНИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ</b>	
<b><u>В.А. Сергеев<sup>1,2</sup>, И.В. Фролов<sup>1</sup>, А.А. Широков<sup>1</sup>, Е.С. Ваганова<sup>2</sup>,</u></b>	45
<b><u>О.А. Давыдова<sup>2</sup>, М.В. Бузаева<sup>2</sup>, Е.С. Климов<sup>2</sup></u></b>	
<sup>1</sup> Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Ульяновск <sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск <b>ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК</b>	

- Д.М. Жигунов<sup>1</sup>, Н.В. Латухина<sup>2</sup>, М.В. Степихова<sup>3</sup>, В.Ю. Тимошенко<sup>1</sup>** 46  
<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва  
<sup>2</sup>Самарский государственный университет, Самара  
<sup>3</sup>Институт физики микроструктур, Нижний Новгород  
**ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В СИСТЕМАХ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**
- А.С. Липатьев<sup>1</sup>, С.В. Лотарев<sup>1</sup>, Т.О. Гельманова<sup>1</sup>, В.И. Савинков<sup>1</sup>, Г.Ю. Шахгильдян<sup>1</sup>, П.Г. Казанский<sup>1,2</sup>, В.Н. Сигаев<sup>1</sup>** 47  
<sup>1</sup>Международный центр лазерных технологий РХТУ им Д.И. Менделеева, Москва  
<sup>2</sup>Университет Саутгемптона, Саутгемптон, Великобритания  
**МОДИФИЦИРОВАНИЕ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА, ДОПИРОВАННОГО ЗОЛОТОМ, ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**
- С.А. Матвеев<sup>1</sup>, С.А. Денисов<sup>1</sup>, В.Ю. Чалков<sup>1</sup>, М.В. Степихова<sup>2</sup>, В.Г. Шенгуров<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>1</sup>, Ю.Н. Дроздов<sup>2</sup>, З.Ф. Красильник<sup>2</sup>** 48  
<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород  
**РОСТ СЛОЕВ ТВЕРДОГО РАСТВОРА  $Si_{1-x}Ge_x/Si(100)$  С НИЗКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ДИСЛОКАЦИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ**
- М.Н. Маякова<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>, А.В. Рябова<sup>1</sup>, Д.В. Поминова<sup>1</sup>, В.В. Воронов<sup>1</sup>, А.Е. Баранчиков<sup>2</sup>, В.К. Иванов<sup>2</sup>** 49  
<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии им.Н.С. Курнакова РАН, Москва  
**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВ  $Ca_{1-x-y}Yb_xEr_yF_{2+x+y}$**
- В.Е. Мешков, В.А. Сухарев, А.П. Садовский, И.Х. Аветисов** 50  
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва  
**ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКСИАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ НА СИНТЕЗ НАНОКРИСТАЛЛОВ СОСТАВА  $A^{II}B^{VI}$**
- В.А. Сергеев<sup>1,2</sup>, А.А. Черторийский<sup>1,2</sup>, Д.К. Подымало<sup>2</sup>, А.М. Низаметдинов<sup>1,2</sup>, Е.С. Ваганова<sup>2</sup>, О.А. Давыдова<sup>2</sup>, М.В. Бузаева<sup>2</sup>, Е.С. Климов<sup>2</sup>** 51  
<sup>1</sup>Ульяновский филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновск  
<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск  
**СПЕКТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПРОПУСКАНИЯ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ПОЛИМЕРНОМ СВЯЗУЮЩЕМ**
- Д.С. Путьрский<sup>1,2</sup>, Ю.В. Кузнецова<sup>1</sup>, А.А. Ремпель<sup>1,2</sup>** 52  
<sup>1</sup>Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург  
<sup>2</sup>Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург  
**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ СУЛЬФИДА КАДМИЯ В МАТРИЦЕ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА**
- С.А. Созыкин, В.П. Бескачко** 53  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск  
**Ab-initio МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКЗОЭДРАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК С ЛИТИЕМ**

**С.А. Антошкина<sup>1</sup>, А.С. Ванецев<sup>2</sup>, О.М. Гайтко<sup>3</sup>, В.М. Кяшкин<sup>1</sup>,  
А.В. Маркин<sup>4</sup>, А.А. Панов<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, Е.В. Тютяев<sup>1</sup>,  
С.Н. Ушаков<sup>5</sup>, Н.А. Пятаев<sup>1</sup>** 54

<sup>1</sup> Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

<sup>2</sup> Institute of Physics, University of Tartu, Tartu

<sup>3</sup> Институт общей неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва

<sup>4</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

<sup>5</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

**МОРФОЛОГИЯ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СПЕКТРАЛЬНО-  
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОПОРОШКОВ  
 $Yb_xY_{1-x}PO_4:Er$**

**А.А. Панов<sup>1</sup>, Е.С. Ваганова<sup>2</sup>, О.А. Давыдова<sup>2</sup>, М.В. Бузаева<sup>2</sup>,  
Е.С. Климов<sup>2</sup>** 55

<sup>1</sup> Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК  
МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОГО МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ**

**Р.П. Ермаков<sup>1</sup>, В.В. Воронов<sup>2</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup>** 56

<sup>1</sup> Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

**ЭВОЛЮЦИЯ АНСАМБЛЯ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ИТТРИЯ В ПРОЦЕССЕ  
ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**Ю.А. Рожнова<sup>1</sup>, А.А. Лугинина<sup>2</sup>, С.В. Кузнецов<sup>3</sup>, П.П. Федоров<sup>3</sup>,  
В.В. Воронов<sup>3</sup>, А.В. Рябова<sup>3</sup>, Д.В. Поминова<sup>3</sup>, В.В. Арбенкина<sup>4</sup>** 57

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт радиоэлектронной техники МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, Москва

<sup>2</sup> Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва

<sup>3</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>4</sup> Московский государственный университет тонких химических технологий  
им. М.В. Ломоносова, Москва

**АП-КОНВЕРСИОННЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ  
 $SrF_2:Yb:Er$**

#### Стендовая сессия

**А.С. Балашов, Д.А. Грачев, А.В. Ершов** 58

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород

**РЕЗОНАТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ ФАБРИ-ПЕРО С АКТИВНЫМ СЛОЕМ,  
СОДЕРЖАЩИМ МАССИВЫ НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ В  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ**

**М.В. Бузаева<sup>1</sup>, Е.С. Климов<sup>1</sup>, О.А. Давыдова<sup>1</sup>, К.В. Кочеткова<sup>1</sup>,  
В.В. Светухин<sup>2</sup>, Д.В. Козлов<sup>2</sup>, Е.С. Пчелинцева<sup>2</sup>, Н.А. Бунаков<sup>2</sup>** 59

<sup>1</sup> Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск

<sup>2</sup> Ульяновский государственный университет, Ульяновск

**МОДИФИЦИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И ПЕРСПЕКТИВЫ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Е.А. Суровезина, Д.А. Грачев, А.В. Ершов** 60

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА АЗОТНО-КИСЛОРОДНОЙ СРЕДЫ ОТЖИГА  
НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ Ge В МАТРИЦАХ  $SiO_2$   
И  $Al_2O_3$**

**А.М. Гурьянов** 61  
Самарский государственный архитектурно-строительный университет, Самара  
ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ПЕРЕХОДНЫХ СЛОЕВ В МДП-СТРУКТУРАХ

**М.Н. Маякова<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>, В.В. Воронов<sup>1</sup>,  
Р.П. Ермаков<sup>1</sup>, Е.А. Гарибин<sup>2</sup>, П.Е. Гусев<sup>2</sup>** 62

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>2</sup>ЗАО ИНКРОМ, Санкт-Петербург

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОШКА ФТОРИДА БАРИЯ,  
ЛЕГИРОВАННОГО ЦЕРИЕМ, КАК ШИХТЫ ДЛЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ  
КЕРАМИКИ

## **ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА** 63

### **Лекции**

**I. Sildos, V. Kiisk; T. Tatta** 64

Institute of Physics, University of Tartu, Tartu

NANO- AND MICROSHAPING OF OPTICAL MATERIALS FOR ADVANCED  
APPLICATIONS

### **Доклады**

**С.С. Алешкина<sup>1</sup>, М.Е. Лихачев<sup>2</sup>, М.В. Яшков<sup>2</sup>, М.М. Бубнов<sup>1</sup>,  
А.Н. Гурьянов<sup>2</sup>** 65

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород

СЕЛЕКЦИЯ МОД ГИБРИДНОГО СВЕТОВОДА

**А.А. Пыненков<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>2</sup>** 66

<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

<sup>2</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ОКСИДА ЦЕРИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, АКТИВИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ

**А.А. Рыбалтовский<sup>1</sup>, К.К. Бобков<sup>1</sup>, В.В. Вельмискин<sup>1</sup>,  
А.А. Умников<sup>2</sup>, И.А. Шестакова<sup>3</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>2</sup>, М.Е. Лихачев<sup>1</sup>,  
М.М. Бубнов<sup>1</sup>, Е.М. Дианов<sup>1</sup>** 67

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН,  
Нижний Новгород

<sup>3</sup>НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва

КЛЮЧЕВАЯ РОЛЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ СОСТОЯНИЯ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА  
В МЕХАНИЗМЕ ФОТООКРАШИВАНИЯ ФОСФОРСИЛИКАТНЫХ И  
АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДОМ  
ИТТЕРБИЯ

**П.Ф. Кашайкин<sup>1,2</sup>, М.Ю. Салганский<sup>3</sup>, К.Н. Нищев<sup>2</sup>, А.Л. Томашук<sup>1</sup>,  
Е. М. Дианов<sup>1</sup>** 68

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

<sup>3</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород

СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ВОЛОКОННЫХ  
СВЕТОВОДОВ ПО РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ



- А.Н. Колядин<sup>1</sup>, Г.К. Алагашев<sup>1</sup>, А.Ю. Луковкин<sup>1,2</sup>, А.Ф. Косолапов<sup>1</sup>,  
А.Д. Прямыков<sup>1</sup>, А.С. Бирюков<sup>1</sup>** 69  
<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва  
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва  
**РЕЗОНАНСНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ИЗГИБНЫХ ПОТЕРЬ В ПОЛЫХ  
МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВОДАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ  
КРИВИЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБОЛОЧКИ**
- В.В. Вельмискин, О.Н. Егорова, Д.Ю. Ерин, А.К. Сенаторов,  
С.Г. Черноок, С.Л. Семёнов, Е.М. Дианов** 70  
Научный центр волоконной оптики РАН, Москва  
**УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ ЗАГОТОВОК  
АКТИВНЫХ КВАРЦЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ПУТЕМ  
СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ ОКСИДОВ**
- Я.Э. Садовникова<sup>1</sup>, В.А. Камынин<sup>1</sup>, А.С. Курков<sup>1</sup>, О.И. Медведков<sup>2</sup>,  
А.В. Маракулин<sup>3</sup>, Л.А. Минашина<sup>3</sup>** 71  
<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
<sup>2</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва  
<sup>3</sup>Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ, Снежинск  
**МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ ТУЛИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОЛЬМИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЗАТВОРА**

## НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ 73

### Лекции

- М.Н. Попова** 74  
Институт спектроскопии РАН, Троицк (Москва)  
**ЗАГАДОЧНЫЙ МЕТАБОРАТ МЕДИ**
- П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, М.А. Борик<sup>2</sup>, Т.В. Волкова<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>,  
Ф.О. Милович<sup>3</sup>, В.А. Мызина<sup>2</sup>, Н.В. Сидорова<sup>1</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</sup>,  
С.Н. Ушаков<sup>2</sup>, А.Н. Чабушкин<sup>1</sup>** 76  
<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва  
**СТРУКТУРА И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ ЧАСТИЧНО  
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ИТТРИЕМ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ,  
АКТИВИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ**
- В.В. Елисеев<sup>1</sup>, В.А. Мартыненко<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>2</sup>, М.И. Новопольцев<sup>2</sup>** 78  
<sup>1</sup>ОАО «Электровыпрямитель», Саранск  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева, Саранск  
**КОМПЛЕКСНЫЙ ПРОЕКТ «ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА  
ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ БАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
СТРУКТУР «КРЕМНИЙ НА МОЛИБДЕНЕ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ»: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ  
НИОКТР**

**В.В. Андреев** 80  
Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В  
СОВРЕМЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ  
ТЕХНОЛОГИЯХ

### Доклады

**А.А. Аккузина, Р.И. Аветисов, И.Х. Аветисов** 81  
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва  
СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ТРИ-(8-ОКСИХИНОЛЯТА)-БОРА

**К.Н. Болдырев<sup>1</sup>, М.Н. Попова<sup>1</sup>, Т.Н. Станиславчук<sup>2</sup>, С.А. Климин<sup>1</sup>,  
В.А. Чернышев<sup>3</sup>, А.Е. Никифоров<sup>3</sup>, В.П. Петров<sup>3</sup>** 82

<sup>1</sup>Институт спектроскопии Российской академии наук, Москва

<sup>2</sup>Department of Physics, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, USA

<sup>3</sup>Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

ДИНАМИКА РЕШЕТКИ И ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В  
МУЛЬТИФЕРРОИКЕ  $\text{PrFe}_3(\text{VO}_3)_4$

**Чан Кхань, Е.Н. Можевитина, А.В. Хомяков, И.Х. Аветисов** 83  
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва  
РАСТВОРИМОСТЬ СЕЛЕНА В НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОМ СЕЛЕНИДЕ  
ЦИНКА

**Е.А. Добрецова<sup>1</sup>, К.Н. Болдырев<sup>1</sup>, П. Дерен<sup>2</sup>** 84

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН, Москва

<sup>2</sup>Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of Sciences, Wroclaw, Poland

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В СПЕКТРАХ ВЫСОКОГО  
РАЗРЕШЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ  $\text{LaAlO}_3:\text{Ho}$ ,  $\text{Tm}$ ,  $\text{Pr}$

**Д.А. Ерофеев<sup>1,2</sup>, Е.П. Чукалина<sup>1</sup>, М.Н. Попова<sup>1</sup>** 85

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН, Троицк (Москва)

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В  
ФЕРРОБОРАТЕ ГОЛЬМИЯ

**В.В. Алисин<sup>1</sup>, М.А. Борик<sup>2</sup>, В.Т. Бублик<sup>3</sup>, А.В. Кулебякин<sup>2</sup>,  
Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>, Ф.О. Милович<sup>3</sup>, В.А. Мызина<sup>2</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</sup>,  
О.Н. Чурляева<sup>1</sup>** 86

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>3</sup>Московский институт стали и сплавов, Москва

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ЧСЦ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО  
НАЗНАЧЕНИЯ

**В.А. Остаточников, С.Г. Мусеев, Д.И. Семенцов** 87

Ульяновский государственный университет, Ульяновск

ВЛИЯНИЕ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ  
СТРУКТУР С НАНОКОМПОЗИТНЫМИ ДЕФЕКТАМИ ЭФФЕКТОВ  
СВЯЗАННЫХ С РАЗМЕРАМИ ЧАСТИЦ

**Л.Д. Исхакова<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>, В.А. Мызина<sup>2</sup>, В.А. Панов<sup>2</sup>, 88**  
**А.Т. Саввичев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>3</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, Москва

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО И  
ЛЕГИРУЮЩИХ ОКСИДОВ В КРИСТАЛЛАХ ЧСЦ, ИЗУЧЕННЫЕ  
МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ И  
РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА**

**О.Б. Петрова, Т.С. Севостьянова, М.О. Анурова, А.В. Хомяков 89**

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

**СВИНЦОВО-БАРИЕВЫЕ ФТОРОБОРАТНЫЕ  
СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ  
НЕОДИМОМ И ЭРБИЕМ**

**И.В. Степанова, К.Г. Гавериш 90**

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ  
СТЕКЛОК**

**А.А. Казанцева<sup>1,2</sup>, Ю.В. Кузнецова<sup>1</sup>, А.А. Ремпель<sup>1</sup> 91**

<sup>1</sup>Институт химии твердого тела, УрО РАН, Екатеринбург

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СТАБИЛЬНОСТЬ КОЛЛОИДНОГО  
РАСТВОРА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СУЛЬФИДА ЦИНКА ZnS**

**С.А. Кокарев<sup>1,2</sup>, С.А. Климин<sup>1</sup>, Н.И. Леонюк<sup>2</sup> 92**

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН, Троицк (Москва)

<sup>2</sup>Геологический факультет МГУ, Москва

**ШТАРКОВСКАЯ СТРУКТУРА ИОНА Sm<sup>3+</sup> в КРИСТАЛЛЕ SmGa<sub>3</sub>(VO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>**

#### Стендовая сессия

**Д.А. Павлов, А.В. Пирогов, Я.В. Куклина 93**

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского,

Нижний Новгород

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ФАЗЫ КРЕМНИЯ  
МЕТОДОМ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ ПЭМ**

**Е.И. Волкова<sup>1</sup>, Д.А. Павлов<sup>1</sup>, Н.В. Малехонова<sup>1</sup>, А.И. Бобров<sup>1</sup>, 94**

**Д.С. Сорокин<sup>1</sup>, Н.В. Байдусь<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет

им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород

<sup>2</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ,

Нижний Новгород

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ,  
ЛЕГИРОВАННОГО ИЗОВАЛЕНТНЫМИ ПРИМЕСЯМИ ИНДИЯ И  
ФОСФОРА, МЕТОДОМ ВРПЭМ**

**А.Д. Гортинская, В.Н. Портнов, Д.А. Воронцов 95**

Нижегородский государственный университет

им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

**ЗАВИСИМОСТЬ ОДНОРОДНОСТИ**

**КРИСТАЛЛОВ (Zn(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) ОТ СОСТАВА РАСТВОРА**

<b>М.А. Борик<sup>1</sup>, В.Т. Бублик<sup>2</sup>, А.В. Кулебякин<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>1</sup>, В.А. Мызина<sup>1</sup>, Ф.О. Милович<sup>2</sup>, С.В. Серяков<sup>1,2</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>2</sup></b>	96
<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва	
<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва	
<b>СТРУКТУРА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ZrO<sub>2</sub> СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	

## ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ 97

### Лекции

<b><u>А.Г. Охримчук<sup>1,2</sup></u></b>	98
<sup>1</sup> ИЦВО РАН, Москва.	
<sup>2</sup> Международный центр лазерных технологий, Российский химико-технологический университет им Д.И. Менделеева, Москва.	
<b>МОДИФИКАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПЬЕЗО- ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b>	

<b><u>Е.В. Жариков<sup>1,2</sup></u></b>	101
<sup>1</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,	
<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН	
<b>ПРОБЛЕМЫ И ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ИЗ РАСПЛАВА</b>	

<b><u>С.Н. Ушаков<sup>1,2</sup>, М.А. Усламина<sup>2</sup>, В.В. Осико<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>2</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup></u></b>	102
<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва	
<sup>2</sup> Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск	
<b>МЕТОД ВЫРАЩИВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ КРИСТАЛЛОВ ФТОРИДОВ, АКТИВИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ, НА РОСТОВОЙ УСТАНОВКЕ С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ «НИКА-3»</b>	

<b><u>П.А. Попов</u></b>	105
Брянский государственный университет им. И.Г. Петровского, Брянск	
<b>ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ОКСИДОВ И ФТОРИДОВ</b>	

### Доклады

<b><u>О.Ю. Биткина, А.С. Егоров, А.П. Савикин, О.Н. Еремейкин</u></b>	110
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ Cr:ZnSe НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 2,7 мкм</b>	

<b><u>А.И. Галиев, В.В. Семашко</u></b>	111
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань	
<b>ФОТОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИСТАЛЛАХ LiCaAlF<sub>6</sub>:Ce<sup>3+</sup></b>	

- Т.О. Гельманова<sup>1</sup>, С.В. Лотарев<sup>1</sup>, А.С. Липатьев<sup>1</sup>, П.Г. Казанский<sup>1,2</sup>, В.Н. Сизаев<sup>1</sup>** 112  
<sup>1</sup>Международный центр лазерных технологий  
РХТУ им Д.И. Менделеева, Москва  
<sup>2</sup>Университет Саутгемптона, Саутгемптон, Великобритания  
**ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛАНТАНОБОРОГЕРМАНАТНОГО СТЕКЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА**
- А.П. Гажулина, Е.А. Исупова, М.О. Марычев** 113  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПСЕВДОСИММЕТРИИ КРИСТАЛЛОВ КТР, ЛЕГИРОВАННЫХ ГАФНИЕМ**
- Н.Г. Захаров<sup>1</sup>, Ю.Н. Фролов<sup>1</sup>, С.Д. Великанов<sup>1</sup>, А.В. Мухин<sup>1</sup>, К.В. Воронцов<sup>1</sup>, А.В. Ларионов<sup>1</sup>, В.А. Гарюткин<sup>1</sup>, Ю.В. Коростелин<sup>2</sup>** 114  
<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров  
<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н.Лебедева, Москва  
**ЭФФЕКТИВНЫЙ И КОМПАКТНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  ЛАЗЕР, ИЗЛУЧАЮЩИЙ В ОБЛАСТИ ДЛИН ВОЛН 2,8 мкм И 3,3 мкм**
- Г.А. Буфетова, Д.А. Николаев, М.Н. Пивкина, В.Б. Цветков** 115  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва  
**ДИСКОВЫЙ  $\text{Nd}:\text{GGG}$  ЛАЗЕР С МНОГОПРОХОДОВЫМ РЕЗОНАТОРОМ И СТРЕХЗОННОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**
- Н.Ф. Рахимов, А.С. Низамутдинов, В.В. Семашко, М.А. Марисов, С.А. Шнайдман** 116  
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань  
**ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ  $\text{CaF}_2:\text{Ce}^{3+}$ , СОАКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ  $\text{Yb}^{3+}$  И  $\text{Lu}^{3+}$**
- М.М. Сергеев, Г.К. Костюк, Р.А. Заколдаев, Е.Б. Яковлев** 117  
Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург  
**ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОУПЛОТНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО СТЕКЛА**
- А.А. Шавельев, А.С. Низамутдинов, В.В.Семашко, М.А. Марисов** 118  
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань  
**ВЫРАЩИВАНИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СО СТРУКТУРОЙ КОЛЬКВИРИИТА  $\text{LiCa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{AlF}_6$ , АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ  $\text{Ce}^{3+}$**
- С.Н. Ушаков<sup>1,2</sup>, М.А. Усламина<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>1</sup>** 119  
<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
**КРИСТАЛЛЫ ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ, АКТИВИРОВАННЫЕ ТУЛИЕМ, ЭРБИЕМ, ИТТЕРБИЕМ И ДИСПРОЗИЕМ, ВЫРАЩЕННЫЕ НА УСТАНОВКЕ «НИКА-3»**
- Ю.К. Воронько, А.А. Соболев, В.Е. Шукшин** 120  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
**СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МОЛИБДАТАХ И ВОЛЬФРАМАТАХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

- А.С. Абрамов, И.О. Золотовский, Д.И. Семенов** 121  
Ульяновский государственный университет, Ульяновск  
МАЗЕР С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА ОСНОВЕ  
МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ СПИНОВЫХ ВОЛН
- И.С. Паняев, Д.Г. Санников, Д.И. Семенов** 122  
Ульяновский государственный университет, Ульяновск  
ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОЛЯРИТОНЫ В СИСТЕМЕ ДИЭЛЕКТРИК –  
НЕЛИНЕЙНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК В МАГНИТНОМ ПОЛЕ
- А.А. Ляпин<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, С.Н. Ушаков<sup>1,2</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup>** 123  
<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
ВИЗУАЛИЗАТОР ДВУХМИКРОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА  
ОСНОВЕ CaF<sub>2</sub>:Ho
- В.А. Гарюткин, Н.Г. Захаров, Е.А. Туданов, А.В. Мухин,  
Ю.Н. Фролов** 124  
Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский  
институт экспериментальной физики, Саров  
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ Tm:YAP ЛАЗЕР С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ
- А.В. Мухин, С.Д. Великанов, Ю.Н. Фролов, Н.Г. Захаров,  
В.А. Гарюткин** 125  
Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский  
институт экспериментальной физики, Саров.  
ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО И СРЕДНЕГО  
ИК-ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР-  
УСИЛИТЕЛЬ Ho:YAG И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР СВЕТА
- Л.А. Нуртдинова, С.Л. Кораблева, М.А. Марисов** 126  
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань  
EFFICIENT UV LASING IN LiY<sub>1-x</sub>Lu<sub>x</sub>F<sub>4</sub>:Re (Re=Ce, Yb) MONOCRYSTALS
- В.В. Павлов, В.В. Семашко, Р.М. Рахматуллин, С.Л. Кораблева** 127  
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань  
ФОТОПРОВОДИМОСТЬ И ФОТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В  
КРИСТАЛЛАХ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ Ce<sup>3+</sup>
- Г.В. Шилова, П.Г. Зверев, Л.И. Излева, П.А. Лыков** 128  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ SBN:61,  
ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Cr, Co, Ni И Ce
- Стендовая сессия**
- Е.В. Уцына, Н.С. Волкова, А.П. Горшков** 129  
Нижегородский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород  
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОКРОВНОГО СЛОЯ GaAs НА  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InAs

- В.В. Грибко, В.Н. Трушин, А.С. Маркелов** 130  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород  
ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРА НА  
РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАССИВА  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОСТРОВКОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
КРИСТАЛЛОВ
- М.А. Фаддеев, Д.С. Нуждин, В.А. Лыков** 131  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород  
ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ КРИСТАЛЛОВ ДИГИДРОФОСФАТА КАЛИЯ С  
ПРИМЕСЬЮ ПЕРМАНГАНАТА КАЛИЯ
- Н.А. Никулаева<sup>1</sup>, Е.А. Романова<sup>1</sup>, D. Furniss<sup>2</sup>, А.В. Seddon<sup>2</sup>, Т.М. Benson<sup>2</sup>, S. Guizard<sup>3</sup>** 132  
<sup>1</sup> Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов  
<sup>2</sup> University of Nottingham, Nottingham, UK  
<sup>3</sup> CNRS-Ecole Polytechnique, Palaiseau, France  
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКОЛ МЕТОДОМ «НАКАЧКА-ЗОНДИРОВАНИЕ»
- Р.Р. Сайфутяров, А.В. Хомяков, А.А. Аккузина, Р.И. Аветисов, О.Б. Петрова, И.Х. Аветисов** 133  
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва  
ЛАЗЕРНОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПЛЕНОК ГИБРИДНЫХ  
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
- М.Л. Лабутина, Д.С. Нуждин, Н.В. Сомов, Е.С. Старостина** 134  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород  
ВЫРАЩИВАНИЕ И СТРУКТУРА КРИСТАЛЛА  $\text{Ca}_{0.94}\text{Sn}_{0.06}\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Нуждин Д.С., Симановский Д.В., Иванов В.А., Фаддеев М.А.** 135  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород  
ОПТИКО-ЭМИССИОННЫЙ ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ РЯДА КРИСТАЛЛОВ  
 $\text{KTi}_{1-x}\text{Hf}_x\text{OPO}_4$
- Б.Н. Казаков, А.В. Ловчев, В.В. Павлов** 136  
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань  
ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ЗАСЕЛЕНИЯ И РАСПАДА ВОЗБУЖДЕННЫХ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ
- Е.В. Глушкин<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, В.В. Семашко<sup>2</sup>, С.Л. Кораблева<sup>2</sup>, С.Н. Ушаков<sup>3</sup>** 137  
<sup>1</sup> Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный Университет, Казань  
<sup>3</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ  
 $\text{Li}(\text{YLu})\text{F}_4:\text{Pr}$
- В.Г. Иванова<sup>1</sup>, Г.В. Шилова<sup>2</sup>, П.Г. Зверев<sup>1,2</sup>** 138  
<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва  
<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ЛАНГАСИТА

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ** 139

**Лекции**

**С.А. Тарасенко** 140

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ**

**Н.С. Аверкиев<sup>1</sup>, И.В. Крайнов<sup>1</sup>, И.В. Рожанский<sup>1,2</sup>, E. Lähderanta<sup>2</sup>** 141

<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland*

**РЕЗОНАНСНОЕ И НЕРЕЗОНАНСНОЕ КОСВЕННОЕ ОБМЕННОЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ**

**П.В. Петров, Ю.Л. Ива́нов, Н.С. Аверкиев** 143

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

**СПИНОВЫЕ И ЗАРЯДОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНО  
ЗАРЯЖЕННЫМИ АКЦЕПТОРАМИ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaAs/AlGaAs**

**А.В. Шорохов<sup>1</sup>, М.А. Пятаев<sup>1</sup>, Н.Н. Хвастунов<sup>2</sup>, Т. Нурт<sup>3</sup>,  
К.Н. Алексеев<sup>4</sup>** 145

<sup>1</sup>*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск*

<sup>2</sup>*Мордовский государственный педагогический институт им. М.Е. Евсевьева, Саранск*

<sup>3</sup>*Leiden University, Leiden, The Netherlands*

<sup>4</sup>*Loughborough University, Loughborough, United Kingdom*

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МАССАХ НА  
ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКИ**

**Ю.Ю. Романова** 146

*Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород*

**БЛОХОВСКИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ И ЗИННЕРОВСКОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ  
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ**

**Доклады**

**А.А. Григорькин<sup>1</sup>, М.А. Пятаев<sup>2</sup>** 151

<sup>1</sup>*Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «КИ»,  
Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева*

**ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ОТКРЫТОМ КВАНТОВОМ КОЛЬЦЕ  
СО СПИН-ОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ**

**В.Д. Кревчик, В.Н. Калинин, Е.Н. Калинин** 152

*Пензенский государственный университет, Пенза*

**ВЛИЯНИЕ КРАЕВОЙ ДИСЛОКАЦИИ НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В  
КВАНТОВОЙ ПРОВОЛОКЕ ВО ВНЕШНЕМ ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ  
ПОЛЕ**

**В.В. Карпунин<sup>1</sup>, В.А. Маргулис<sup>2</sup>** 153

<sup>1</sup>*Мордовский государственный педагогический институт им. М.Е. Евсевьева, Саранск*

<sup>2</sup>*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск*

**ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В  
ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ КВАНТОВОЙ ПРОВОЛОКЕ**



- В.Д. Кревчик<sup>1</sup>, М.Б. Семенов<sup>1</sup>, Р.В. Зайцев<sup>1</sup>, П.В. Кревчик<sup>1</sup>, Д.О. Филатов<sup>2</sup>** 154  
<sup>1</sup>Пензенский государственный университет, Пенза  
<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ 1D-ТУННЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ**
- О.Д. Позднякова, А.В. Шорохов** 155  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭФФЕКТА ДЖОЗЕФСОНА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МАССИВАХ КОНТАКТОВ ДЖОЗЕФСОНА**
- С.В. Крючков<sup>1,2</sup>, Е.И. Кухарь<sup>1</sup>** 156  
<sup>1</sup>Волгоградский государственный социально-педагогический университет, Лаборатория физики низкоразмерных систем, Волгоград  
<sup>2</sup>Волгоградский государственный технический университет, Волгоград  
**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ГРАФЕНОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКИ**
- М.А. Пятаев<sup>1</sup>, С.Н. Ульянов<sup>2</sup>** 157  
<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
<sup>2</sup>Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва  
**ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОТОТОК ЧЕРЕЗ КВАНТОВУЮ ПРОВОЛОКУ С ПРИМЕСЬЮ**
- М.В. Денисенко, А.М. Сатанин** 158  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
**НОВЫЕ СЦЕНАРИИ ТУННЕЛИРОВАНИЯ МЕЖДУ КВАЗИЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УРОВНЯМИ КУБИТА В ПОЛЕ БИГАРМОНИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА**
- М.А. Пятаев<sup>1</sup>, А.В. Шорохов<sup>1</sup>, Д.С. Приймак<sup>2</sup>, К.Н. Алексеев<sup>2</sup>** 159  
<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
<sup>2</sup> Loughborough University, Loughborough, United Kingdom  
**ВОЗМОЖНОСТЬ УСИЛЕНИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКОЙ, ПОМЕЩЕННОЙ В СКРЕЩЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАГНИТНОЕ ПОЛЯ**
- М.В. Денисенко, В.О. Муняев, А.М. Сатанин** 160  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
**МНОГОФОТОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ КУБИТОВ**
- V.A. Maksimenko<sup>1,2</sup>, A.A. Koronovskii<sup>1,2</sup>, V.V. Makarov<sup>1,2</sup>, K.N. Alekseev<sup>3</sup>, A.G. Balanov<sup>2,3</sup>, A.E. Hramov<sup>1,2</sup>** 161  
<sup>1</sup>Saratov State University, Saratov  
<sup>2</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov  
<sup>3</sup>Loughborough university, Loughborough, UK  
**STUDY OF DOMAIN INSTABILITY IN STRONGLY-COUPLED SEMICONDUCTOR STRUCTURE**

**В.В. Макаров<sup>1,2</sup>, А.А. Короновский<sup>1,2</sup>, В.А. Максименко<sup>1,2</sup>, А.Г. Баланов<sup>3</sup>, 162**

**А.Е. Храмов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет, Саратов

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет, Саратов

<sup>3</sup>Университет города Лафборо, Великобритания

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕШНЕЙ РЕЗОНАНСНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ  
УСИЛЕНИЯ ВНЕШНЕГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА В  
СУБТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ  
СВЕРХРЕШЕТКЕ**

**А.И. Малышев, Г.Г. Исупова**

163

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

**ОТКРЫТЫЙ КВАНТОВЫЙ БИЛЛИАРД В МАГНИТНОМ ПОЛЕ КАК  
СПИНОВЫЙ ФИЛЬТР**

**Н.В. Курова, В.А. Бурдов**

164

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород

**ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИЯ В  
НАНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ ДОНОРАМИ**

**В.Я. Демиховский, А.В. Тележников**

165

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород

**ЭВОЛЮЦИЯ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ  
ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ**

**К.А. Баранцев, А.Н. Литвинов**

166

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург

**ТУННЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КВАНТОВОЙ ЯМЫ  
ИЗ СМЕЖНОЙ КВАНТОВОЙ ЯМЫ ПРИ КОГЕРЕНТНОМ ПЛЕНЕНИИ  
НАСЕЛЕННОСТЕЙ**

## Стендовая сессия

- Е.С. Азарова, Г.М. Максимова** 167  
*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*  
**ВЛИЯНИЕ НЕУПОРЯДОЧЕННОСТИ НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА  
МУЛЬТИБАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА С  
ПРОСТРАНСТВЕННО МОДУЛИРОВАННОЙ ДИРАКОВСКОЙ ЩЕЛЬЮ**
- А.О. Сельский<sup>1,2</sup>, А.Г. Баланов<sup>3</sup>, А.А. Короновский<sup>1,2</sup>,  
О.И. Москаленко<sup>1,2</sup> А.Е. Храмов<sup>1,2</sup>** 168  
*<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Саратов  
<sup>2</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов*  
**ВЛИЯНИЕ МЕЖМИНИЗОННОГО ТУННЕЛИРОВАНИЯ НА ДИНАМИКУ  
ДОМЕНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ**
- А.С. Козулин, А.И. Малышев** 169  
*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*  
**МНОГОМОДОВЫЙ ТРАНСПОРТ В ВОЛНОВОДАХ СО СПИН-  
ОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ**
- АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ** 170

# **НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ**

# СПЕКТРОМИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ МОЛЕКУЛ И КВАНТОВЫХ ТОЧЕК: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

А.В. Наумов

*Институт спектроскопии Российской академии наук, Троицк (Москва)*

*Московский Педагогический Государственный Университет, Москва*

*E-mail: [naumov@isan.troitsk.ru](mailto:naumov@isan.troitsk.ru) Web-page: [www.single-molecule.ru](http://www.single-molecule.ru)*

Спектромикроскопия одиночных квантовых излучателей (молекул, молекулярных комплексов и нанокристаллов) – относительно молодое направление оптической спектроскопии. За чуть более чем 20 лет, прошедших с первых экспериментов по детектированию спектров одиночных молекул (ОМ), данное направление интенсивно развивалось и стало одним из наиболее актуальных в физике, физической химии, биофизике и смежных науках. (см. обзор [1], а также специальные выпуски журналов, посвященные развитию данного направления [2-4]). Особенно интенсивно данное направление стало развиваться с появлением новых искусственных люминофоров – молекулярных комплексов, металлорганических и гибридных излучателей, полупроводниковых и диэлектрических нанокристаллов (квантовых точек, КТ), поскольку появилась возможность синтеза люминесцирующих нанообъектов с заданными фотофизическими характеристиками. Так, полупроводниковые и диэлектрические КТ обладают рядом необычных фотофизических и спектральных свойств, которые определяются их локальной структурой, размерами и микроскопическими особенностями взаимодействия с ближайшим окружением.

Все возрастающий интерес к направлению спектроскопии одиночных излучающих нанообъектов обусловлен рядом причин:

❶ Физические свойства вещества могут быть исследованы с ее помощью на уровне одиночных молекул.

❷ Оптические спектры и спектральная динамика одиночных примесных хромофорных центров (атомов, молекул), внедренных в изучаемую прозрачную матрицу в качестве нанозондов, содержат беспрецедентно богатую информацию как о самих излучателях, так и о параметрах ближайшего окружения. Таким образом, по спектрам ОМ может исследоваться локальная динамика матрицы, а также ближнеполевое влияние структуры материала на фотофизические характеристики излучателей.

❸ Регистрация люминесцентных изображений одиночных точечных излучателей в схеме сканирующего конфокального микроскопа или классического люминесцентного микроскопа с двумерным детектором позволяет реконструировать координаты источника с субдифракционной (нанометровой) точностью, которая ограничена только стабильностью установки, отношением сигнал к шуму регистрируемого излучения и размерами самого точечного источника.

Реконструкция координат излучателей осуществляется путем анализа (и, в ряде случаев, инструментальной модификации) аппаратной функции точечного источника (англ., point spread function, PSF) [5,6].

Для этого необходимо проводить компьютерный анализ изображения ОМ (КТ), зарегистрированного с использованием широкопольного люминесцентного микроскопа с многоканальной системой регистрации на основе высокочувствительного 2D-матричного детектора или с использованием сканируемого конфокального микроскопа с одноканальным детектором.

Прецизионная локализация одиночного точечного источника – краеугольный камень спектроскопии ОМ (КТ) и ее приложений. Во многих случаях точность локализации ОМ (КТ) определяется полуэмпирической формулой [6]:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\Gamma_{PSF}^2 + a^2/12}{N}\right) \cdot \left(\frac{16}{9} + \frac{8\pi\Gamma_{PSF}^2 f_0^2}{a^2 N}\right)},$$

где  $N$  – количество зарегистрированных фотонов люминесценции точечного излучателя,  $a$  – размер пикселя детектора,  $f_0$  – средний уровень паразитного сигнала,  $\Gamma_{PSF}$  – «обобщенная ширина» PSF. При стандартных параметрах современных установок это дает точность восстановления координаты ОМ (КТ)  $\sim 10$  нм при детектировании 1000-2000 фотонов полезного сигнала люминесценции излучателя. Для наиболее ярких хромофоров такое количество фотоотчетов может быть достигнуто при экспозициях от нескольких десятком мс.

Для достижения субдифракционной точности определения координат необходимо принимать во внимание аппаратную функцию точечного источника (PSF). В простейшем случае можно рассматривать точечный излучатель с «идеальной» диаграммой направленности (излучение в  $4\pi$  стерадиан). В этом случае люминесцентное изображение ОМ (КТ) описывается двумерной функцией Эйри (рис. 1а), и поперечные координаты излучателя могут быть определены нахождением «центра масс» изображения, зарегистрированного матричным детектором. Такое «приближение центроида» наиболее часто используется в современных методах микроскопии сверхвысокого приближения. Более точный анализ требует аппроксимации зарегистрированного изображения ОМ (КТ) двумерной функцией Гаусса (симметричной, асимметричной, эллиптической) (рис. 1(с)). Кроме того, аппроксимация изображения обобщенной функцией Гаусса существенно упрощает локализацию (т.е. предварительный поиск) изображения ОМ (КТ)

На рис. 1(с) приведена иллюстрация к анализу люминесцентного изображения одиночной органической молекулы в полимерной пленке, зарегистрированного при температуре  $T=4.3$  К при возбуждении на длине волны  $\sim 532$  нм. В данном случае точность определения поперечных координат молекулы аппроксимацией двумерной функцией Гаусса составила  $\sim 30$  нм.

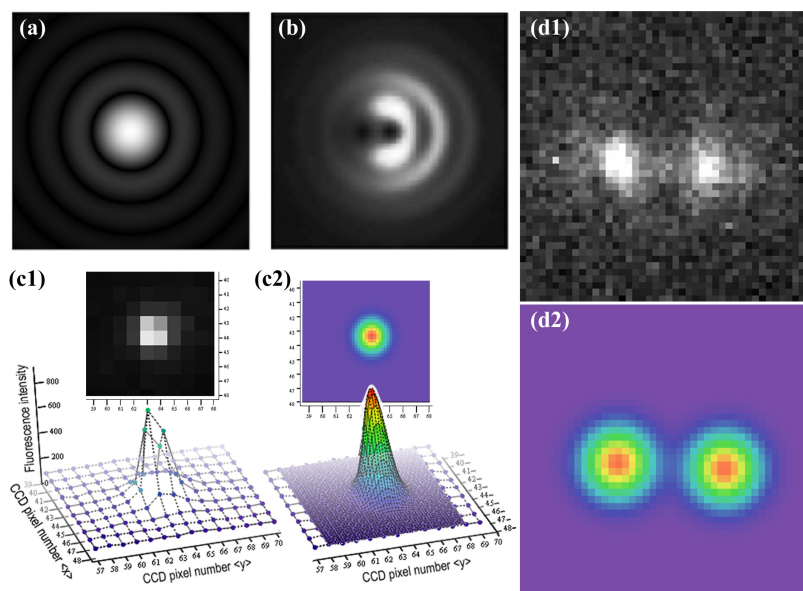


Рис. 1. Иллюстрация к вопросу об анализе аппаратной функции точечного источника излучения. (a) 2D-функция (диск) Эйри. (b) PSF источника в дипольном приближении при ориентации излучающего диполя под углов в 60 градусов по отношению к оптической оси микроскопа [7]. (c1) Типичное изображение ОМ в полимерной пленке при  $T=4.3$  К. (c2) Определение поперечных координат той же ОМ путем аппроксимации изображения симметричным 2D-Гауссианом. (d1) Люминесцентное изображение одиночной КТ, зарегистрированное с использованием техники биспиральной (DHPSF) аппаратной функции. Угол поворота линии, соединяющей центры двух лепестков PSF соответствует аксиальной координате излучателя. (d2) Определение всех трех координат КТ аппроксимацией двухлепесткового изображения суммой двух 2D-Гауссианов. (Взято из [8]).

Более точный анализ требует принимать во внимание трансформацию PSF, связанные с наличием статического дипольного момента или дипольного момента перехода излучающей молекулы (рис. 1b) [7]. Наконец, «идеальный» анализ должен принимать во внимание искажение PSF вблизи границ раздела сред с различными показателями преломления.

Также PSF может быть намеренно изменена для реализации сверхразрешения по всем трем пространственным координатам, например с использованием техники биспиральной аппаратной функции (double helix point spread function, DHPSF) [5]. В этом случае изображение ОМ (КТ) приобретает сложную форму (рис. 1d) и требует специфического анализа.

Обработка изображений ОМ (КТ) в общем случае состоит из нескольких этапов: подавление шумов, предварительная локализация, аппроксимация с использованием «ожидаемой» PSF и, если возможно, оценки и подтверждения достоверности (например, путем анализа временных траекторий или гиперспектрального анализа).

Таким образом, восстановление координат для статистически большого количества одиночных зондовых люминофоров позволяет реконструировать структуру исследуемого материала с нанометровым пространственным разрешением. На этом принципе основывается бурно развивающееся мультидисциплинарное направление *дальнеполевой оптической микроскопии сверхвысокого разрешения* с реконструкцией

люминесцентных изображений одиночных точечных излучателей. В самые последние годы ведущими международными коллективами разработаны оригинальные методы трехмерной (3d-) визуализации одиночных молекул, которые позволяют определять с нанометровой точностью все три координаты точечного излучателя. В сочетании с детектированием спектров и спектральной динамики одиночных нанозондов техника микроскопии сверхвысокого разрешения открывает возможность спектрально-пространственной (гиперспектральной) нанодиагностики конденсированных сред, что является одним из наиболее востребованных направлений в данной области науки.

④ Методы люминесцентной спектроскопии одиночных молекул открывает перспективы широкого применения в самых различных областях науки и технологий: напр., при создании высокоэффективных управляемых источников одиночных фотонов, при решении задач современной метрологии, при создании высокочувствительных наносенсоров, при создании современных оптических методов проточной цитологии и высокоскоростной расшифровки ДНК.

Особенно информативными и наиболее чувствительными к параметрам ближайшего окружения являются бесфонные спектральные линии (БФЛ) примесных центров, наблюдаемые, как правило, при криогенных температурах. Указанное обстоятельство открывает уникальную возможность исследования на микроскопическом уровне внутренней динамики твердотельных сред, а также позволяет осуществлять диагностику структуры материала с высоким (субволновым) пространственным разрешением (см. обзор [1] и ссылки там). Принципиальной задачей в развитии данного направления является поиск фундаментальных закономерностей, связывающих уникальную микроскопическую информацию на уровне одиночных молекул (излучающих центров) с макроскопическими характеристиками объемных образцов. Путь к решению данной проблемы состоит в статистическом анализе спектральных данных, полученных для большого количества одиночных молекул. Активное использование техники синхронной регистрации спектров возбуждения флуоресценции большого количества ОМ с использованием схемы люминесцентного микроскопа долгое время было невозможно по ряду причин: низкая чувствительность матричных детекторов, сложности с накоплением и оперативной обработкой гигантских массивов информации, отсутствие оптимальных алгоритмов быстрого автоматического распознавания флуоресцентных изображений квантовых объектов. Развитие компьютерной техники и появление новых высокочувствительных матричных детекторов (CCD- и CMOS-камер) позволило приступить к практической реализации и систематическому использованию данной техники.

Начиная с 2004 года, в Институте спектроскопии РАН разрабатываются аппаратно-программные решения и оригинальные



методики для оперативного детектирования и компьютерного анализа флуоресцентных изображений, спектров и спектральных историй гигантского количества одиночных квантовых объектов, зарегистрированных с использованием лазерного люминесцентного микроскопа. Разработанный аппаратно-программный комплекс позволил приступить к качественно новым измерениям в области спектроскопии примесного центра – *регистрации индивидуальных спектров и пространственных координат всех эффективно излучающих центров в макроскопическом объеме твердотельного образца* легированного в малой концентрации флуоресцирующими молекулами [9].

Новая техника позволила осуществить дальнеполевую визуализацию локальных особенностей структуры твердых пленок (дефектов, трещин, дислокаций) с характерными размерами от нескольких нанометров [9,10].

Метод основан на последовательной отдельной регистрации флуоресцентных изображений и индивидуальных спектров гигантского количества (сотни тысяч – миллионы) флуоресцирующих молекул и статистическом анализе полученных данных. Свечение ОМ возбуждается селективно путем перестройки частоты узкополосного лазера в резонанс с их частотами электронных переходов без возбуждения других молекул в том же объеме образца.

Задача диагностики протяженных объектов требует детектирования значительного количества ОМ и их высокой пространственной плотности. В этом случае одновременное свечение тысяч молекул не позволяет различить изображения индивидуальных ОМ, находящиеся внутри общего дифракционного предела. Обойти это затруднение возможно, различая молекулы по частоте (положению) их узких БФЛ. Неоднородное уширение спектров ОМ приводит к широкому распределению частот их БФЛ. Это позволяет последовательно зарегистрировать и идентифицировать большое количество ОМ в объеме, ограниченном дифракционным пределом, и, как следствие, достичь необходимую для отображения протяженной структуры (трещин, дефектов) образца пространственную плотность флуоресцентных зондов. Анализ пространственного расположения примесных ОМ позволяет визуализировать особенности структуры твердого образца с нанометровой точностью, превышающей дифракционный предел. Кроме того, метод предоставляет дополнительные «спектральные координаты» - индивидуальные спектральные характеристики примесных молекул – нанозондов, что позволяет осуществлять своеобразную «спектральную нанотомографию», отражающую различные особенности локальной структуры и динамики образца.

Таким образом, в настоящее время в арсенале спектроскопии примесного центра появилась возможность на микроскопическом уровне (на уровне одиночных излучающих центров) проанализировать процесс формирования неоднородно уширенного спектра, усредненного по

гигантскому ансамблю хромофоров, и, как следствие, связать локальные спектральные и динамические характеристики со структурой материала и с его макроскопическими фотофизическими свойствами.

В настоящей лекции обсуждаются основные методы детектирования одиночных точечных излучателей (хромофорных органических молекул, полупроводниковых квантовых точек), временные и спектральные характеристики ОМ и КТ в различных средах, в т.ч. явления мерцания, тушения и усиление люминесценции одиночных излучателей. Обсуждаются также основы современных методов оптической микроскопии сверхвысокого разрешения, основанных на реконструкции координат одиночных зондовых излучателей, в том числе – методы 3D-микроскопии с инструментальной модификацией PSF. Показано, как уникальные свойства БФЛ могут быть положены в основу новой техники «многоцветовой» дальнеполевой оптической нанодиагностики твердых сред и наноструктур, где реконструкция изображения объекта осуществляется путем регистрации бесфоновых люминесцентных изображений и определения с субдифракционной точностью координат большого количества зондовых ОМ.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда.

В лекции используются иллюстрации из работ [8-10], выполненных в соавторстве при поддержке РФФИ, Гранта Президента РФ для поддержки молодых докторов наук, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Программы ОФН РАН «Фундаментальная оптическая спектроскопия и ее приложения». Автор выражает признательность коллегам, в сотрудничестве с которыми получены соответствующие результаты. Отдельную благодарность автор выражает к.ф.-м.н. Еремчеву И.Ю. (развитие DHPSF-техники) и к.ф.-м.н. Горшелеву А.А. (регистрация всех эффективно излучающих одиночных молекул в макроскопическом образце).

1. A.V. Naumov, Успехи Физических Наук **183**, 633 (2013).
2. Special Issue of Nat. Photonics **3**, 361 (2009).
3. Special Issue of Phys. Chem. Chem. Phys. **13**, 1697 (2011).
4. Special Issue of Chem. Soc. Rev. **43**, 963 (2014).
5. S. R. P. Pavani, M. A. Thompson, et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. **106**, 2995 (2009).
6. K.I. Mortensen, L.S. Churchman, et al., Nat. Methods **7**, 377 (2010).
7. S.Habuchi, S.Onda, M.Vacha, Phys.Chem.Chem.Phys. **13**, 1743 (2011).
8. A.V.Naumov, I.Y.Eremchev, A.A.Gorshchev, Eur. Phys. J. D (2014).
9. A.V. Naumov, A.A. Gorshchev, Y.G. Vainer, et al., Phys. Chem. Chem. Phys. **13**, 1734 (2011).
10. A.V. Naumov, A.A. Gorshchev, Y.G. Vainer, et al., Angew. Chem. **48**, 9747 (2009).

## ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОБЪЕКТЫ ДЛЯ ТЕРАНОСТИКИ

Д.А. Горин

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
Саратов*

Впервые обратил внимание ученых на важность исследования микромира знаменитый физик, нобелевский лауреат Ричард Фейнман в своей лекции «Внизу еще много места», подзаголовком которой являлся, по сути, лозунг «Приглашение в новую область физики». Это было 29 декабря 1959 года на заседании Американского Физического общества в Калифорнийском Технологическом институте. Текст лекции был опубликован в виде статьи в 1960 г. [1]. Вот, что писал Ричард Фейнман в своей статье относительно применения новых технологий в медицине: **«Мой друг (Альберт Р. Хиббс) предложил очень интересную возможность для относительно маленьких машин. Он сказал что, несмотря на то, что это очень дикая идея, было бы интересно в хирургии, если Вы могли бы заглотить хирурга. Вы помещаете механического хирурга внутрь кровеносного сосуда, и он идет к сердцу и «смотрит» вокруг. (Конечно, информация должна передаваться в антенну.) Он находит, какой клапан с изъяном (поврежден), берет маленький скальпель и оперирует его. Другие маленькие машины могут быть также постоянно инкорпорированы в организм и помогать некоторым неадекватно функционирующим органам».** Это было сказано в годы, когда взгляд человечества был устремлен в небо, шла битва за освоения космического пространства между сверхдержавами СССР и США. Показательным в этом плане является журнал «Caltech Engineering of Science», в котором и была опубликована знаменитая лекция Фейнмана и который пестрил рекламой фирм связанных с космосом, набором инженеров для проектов связанных с аэрокосмической программой США. Без сомнения, Ричард Фейнман является Циолковским освоения микромира. Интенсивное развитие космической техники и смежных областей привело к тому, что мы о космическом пространстве знаем больше, чем о собственном организме, поскольку в настоящее время нет эффективных и удобных систем, как для исследования и постоянного мониторинга состояния организма, так и средств доставки биологически активных веществ.

В настоящем быстро меняющемся мире человечество пришло к точке, с которой начинается усиление конкурентной борьбы за освоение микромира прежде всего в области биомедицинских применений, накал которой в ближайшее время будет сравним с битвой за освоение космического пространства. Решение этой задачи потребует междисциплинарного подхода и совместной работы химиков, физиков, биологов, математиков, программистов. В первую очередь будут решаться, и уже делаются шаги в этом направлении, следующие задачи: 1) создание

искусственных органов и тканей; 2) интенсивное применение в медицине достижений молекулярной биологии; 3) создание принципиально новых средств доставки лекарств, которые можно разделить, пользуясь космической терминологией на два типа: а) «спутники»; б) «орбитальные станции», которые, скорее всего, будут интенсивно использоваться и для решения первой и второй задач. Основное их отличие будет в различной мобильности этих устройств и их функциональном назначении. Первый класс объектов «спутники» будет обладать гораздо более высокой мобильностью по сравнению со вторым, более стационарным. Их общей особенностью является сочетание диагностики (на молекулярном уровне) и контролируемого высвобождения биологически активных веществ. «Спутники» также могут выполнять транспортную функцию. «Орбитальные станции» могут находиться, как внутри организма, так и на границе раздела организм/окружающая среда. Почему так важно изучение живых организмов с помощью описанных выше объектов? Это связано не только с развитием современной превентивной и персональной медицины, но и с необходимостью учиться у природы, вершиной творения которой является человеческий организм, который и является микрокосмосом.

Учитывая мировые тренды, особенностью **нового поколения систем доставки лекарств** будет **анализ собранных биосенсорами данных и составление прогноза для принятия решения о высвобождении инкапсулированных биоактивных веществ на основе анализа их временных и пространственных концентрационных зависимостей**, которые являются маркерами определенных процессов, протекающих в организме при различных заболеваниях. Примером таких маркеров могут служить концентрация глюкозы в крови при сахарном диабете [2], наличие белков определенного вида при состоянии стресса [3]. Таким образом, современные диагностические системы – «спутники» и «орбитальные станции» наряду с сенсорной частью, полезной нагрузкой (биологически-активные вещества), способностью перемещаться в пространстве, должны содержать бортовой компьютер и иметь связь с «центром управления полетами» (ЦУП). Функции бортового компьютера могли бы взять на себя мобильные устройства связи, которые бы передавали периодически информацию в ЦУП. Роль последних будут играть специальные мощные серверы, которые обрабатывают информацию и в случае необходимости передают ее лечащему врачу, который и принимает решения о высвобождении биологически активных веществ, если речь, конечно, не идет о критических ситуациях, требующих немедленного вмешательства, в этом случае решение принимает бортовой компьютер и передает эту информацию доктору. Конечно, все описанное выше похоже на научную фантастику, но именно этот сценарий мог бы реализовать настоящую революцию в медицине, которая остается наиболее консервативной отраслью современной науки.

Понятно, что при разработке таких систем сильно возрастает роль границ раздела фаз и нахождение способов управления ими. Особую роль будут играть границы типа живая система/электронное устройство. Исследование таких систем требует совместной работы специалистов в области физики и химии, биологии и медицины.

Здесь, хотелось бы сформулировать список обязательных составляющих предполагаемого «спутника» и задел по каждому из направлений, итак современный объект тераностики должен содержать: 1) сенсорную часть, которая расположена на интерфейсе спутник/изучаемая сред, прототипы таких устройств уже созданы [4, 5]; 2) инкапсулированное в объем капсулы биологически-активное вещество [6, 7]; 3) систему обеспечивающую управление перемещением: в случае градиента магнитного поля, наличие наночастиц магнетита в оболочке, либо в объеме «спутника-капсулы» [8]; в случае перемещения или фиксации лазерным пинцетом, наличие плазмонно-резонансных наночастиц [9]; 4) материалы оболочки, обеспечивающие высвобождение инкапсулированного вещества с помощью внешних воздействий, например, ультразвукового воздействия [10, 11] или электромагнитного (ЭМ) излучения, включая когерентное и высокоинтенсивное ЭМ излучение [12, 13].

Необходимо также несколько слов сказать о предполагаемых размерах описанных выше устройств. Скорее всего, это будут наноструктурированные объекты микронных размеров. Эти размеры характерны и для живой природы, механизмы функционирования которой мы часто копируем, поскольку размер функциональных элементов исчисляется микрометрами (например, клетки крови), однако, без сомнения, управление их жизнедеятельностью определяется объектами наноуровня (ионы, молекулы белков и т.д.).

Становится ясно, что тот, кто будет лидером в направлении разработки нового поколения устройств, совмещающих диагностические и терапевтические функции, займет очень выгодную нишу в мировом разделении труда, а по сути, будет иметь приоритет в области науки, которая является очень важным, как с научной, так и с экономической, и политической точки зрения. Это направление связано с созданием и изготовлением систем для тераностики [14] нового поколения, которые сочетают в себе диагностические и терапевтические функции с системой обработки данных и принятия решений. Хорошим примером классического объекта тераностики являются наночастицы магнетита, которые одновременно можно использовать и как контрастный агент для магнитно-резонансной томографии, и как агент обеспечивающую локальную гипертермию при приложении переменного магнитного поля [15].

Этот подход может вызвать революционные изменения в средствах и методах диагностики и лечения, а также дать информацию о процессах, происходящих в организме при его переходе из патологии в нормальное

состояние и наоборот, которая очень важна для новых интенсивно развивающихся областей современной медицины – превентивной и персональной медицины. Это позволит: 1) увеличить эффективность диагностики и лечения; 2) существенно сократить стоимость лечения, и как следствие сделать медицину более доступной; 3) существенно улучшить качество жизни больных людей; 4) выйти на новый уровень в плане профилактики заболеваний и лечения их на ранних стадиях.

1. R.P. Feynmann, Caltech Engineering of Science. **23**, 5, 22 (1960).
2. K. Ma, J.M. Yuen, N.C. Shah et al., Anal. Chem. **83**, 9146 (2011).
3. M.R. Hara, J.J. Kovacs, E.J Whalen et al., Nature. **477**, 349 (2011).
4. A. Yashchenok, A. Masic, D. Gorin et al., Small. **9**, 3, 351 (2013).
5. I.Y. Stetsyura, A.V. Markin, A.N. Ponomarev et al., Langmuir. **29**, 12, 4140 (2013).
6. D.V. Volodkin, R. von Klitzing, H. Moehwald, Angew. Chem. **122**, 9444 (2010).
7. S. Schmidt , M. Behra , K. Uhlig et al., Adv. Funct. Mater. **23**, 116 (2013).
8. T.A. Kolesnikova, Ga.G. Akchurin, S.A. Portnov et al., Laser Physics Letters. **9**, 9, 643 (2012).
9. L. Piao, S. Park, H.B. Lee et al., Anal. Chem. **82**, 447 (2010).
10. D.G. Shchukin, D.A. Gorin, H. Möhwald, Langmuir. **22**, 7400 (2006).
11. T.A. Kolesnikova, D.A. Gorin, P. Fernandes et al., Adv. Func. Mater. **20**, 1189 (2010).
12. D.A. Gorin, S.A. Portnov, O.A. Inozemtseva et al., Phys. Chem. Chem. Phys. **10**, 6899 (2008).
13. A.M. Yashchenok, D. N. Bratashov, D.A. Gorin et al., Adv. Funct. Mat. **18**, 3136 (2010).
14. V.V. Tuchin, *Dictionary of biomedical optics and biophotonics*, SPIE Press, Bellingham, WA, 2012.
15. I. Rabias, D. Tsitrouli, E. Karakosta et al., Biomicrofluidics. **4**, 024111 (1-8) (2010).

## СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ПОЛИМЕРЕ

В.И. Кочубей, Е.К. Волкова, Ю.Г. Конюхова

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
Саратов*

*E-mail: [saratov\\_gu@mail.ru](mailto:saratov_gu@mail.ru)*

Хорошо известно, что метод и условия синтеза наночастиц оказывают большое влияние, как на размеры частиц, так и на их свойства. Цель представляемой работы состояла в систематизации результатов и обобщении различных методик синтеза композиционных наноматериалов на основе наночастиц полупроводниковых оксидов и сульфидов металлов в матрицах полимеров.

Исследованы свойства наночастиц, полученных методом высокотемпературного разложения прекурсоров в матрицах полиэтилена высокого давления (ПЭВД) и ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ). В качестве прекурсоров при синтезе наночастиц оксидов ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZnO}$ ) использовали соли карбоновых кислот, разложение которых проводили в среде раствор-расплава полимеров. Наночастицы сульфидов ( $\text{ZnS}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{PbS}$ ) в полимерах получали при разложении смеси различных солей (ацетатов, хлоридов, сульфатов) и тиомочевины, или в потоке сероводорода. Синтезированы также наночастицы  $\text{Fe}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}(\text{CuO})$ ,  $\text{ZnO}$  разложением ацетатов металлов.

С помощью комплекса физико-химических методов исследования: РФА, ТЕМ, ДТА проведено исследование размера, состава и строения наночастиц, стабилизированных в матрицах полимеров. Установлено, что в матрицах ПЭВД и на поверхности микрочастиц УПТФЭ образуются наночастицы перечисленных соединений. Средний размер наночастиц изменялся в зависимости от концентрации от 1 до 10 нм. Распределение наночастиц было относительно узким. С помощью метода EXAFS исследована структура полученных материалов на основе наночастиц. Показано, что в большинстве случаев образующиеся наночастицы имеют плохо сформированную структуру или являются аморфными. Существенно повысить совершенство кристаллической структуры наночастиц можно выбором оптимальных условий синтеза. Таковыми являются температура разложения и природа исходных соединений. Например, разложением  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  при температуре не выше 250 °С, в матрице полиэтилена можно получить нанокристаллические частицы оксида цинка с характерной структурой вюрцита. Использование ацетатов  $\text{Zn}$  и  $\text{Cd}$  в смеси с тиомочевинной при синтезе соответствующих сульфидов приводит к получению наночастиц, структурные характеристики которых не соответствуют ни одной из известных для сульфидов структур. Однако, если в качестве исходного соединения, вместо ацетатов использовать сульфаты или хлориды  $\text{Zn}$  и  $\text{Cd}$ , то можно получить наночастицы со средним размером ~ 5 нм с характерными структурами, сфалерита – для

ZnS и вюрцита для CdS, причем независимо от природы полимерной матрицы.

В спектрах поглощения, измеренных при комнатных температурах, композитов CdS+ПЭВД зарегистрировано наличие экситонной полосы на 475 нм. Край положения композитов лежит в УФ области независимо от размеров наночастиц, что может быть объяснено полидисперсностью образцов. Для наночастиц ZnO обнаружена люминесценция в области 550-600 нм.

Показано, что экспериментально полученные спектры возбуждения и люминесценции могут быть искажены вследствие рассеяния и перепоглощения света внутри образца. Для образцов CdS+ПЭВД в спектрах люминесценции наблюдается две полосы. Установлено, что в процессе хранения амплитуда полосы в длинноволновой области спектра увеличивается. Однако проведенный нами учет перепоглощения и рассеяния показал, что в спектрах люминесценции полосы в области 530–550 нм являются кажущимися. Корректированные спектры демонстрируют люминесценцию только в синей области, т.е. люминесценцию полиэтилена. Люминесценции наночастиц CdS не обнаружено.

Люминесцентные свойства наночастиц сильно зависят от состояния их поверхности. Проведен синтез плоских наночастиц CdS в растворе ортоксилота при повышенных температурах путем замещения лигандов в пивалате кадмия элементарной серой. Образование структуры CdS подтверждено данными EXAFS окружения кадмия. Диаметр частиц составляет 2.5-3 нм и толщина около 1 нм. Показано что, изолированные наночастицы в растворе люминесцируют в отличие от ранее изученных наночастиц синтезированных в полиэтилене. В спектрах люминесценции наблюдается полоса с максимумом на 550 нм при возбуждении в области 528 нм. Причиной этого является, по-видимому, то, что стабилизация наночастиц в полиэтилене происходит через ОН-группы, в то время как стабилизация в растворе ортоксилота за счет образования сольватной оболочки из анионных остатков пивалевой кислоты. Известно что наночастицы CdS могут существовать с внешним слоем состоящим преимущественно как из атомов серы так и атомов кадмия. По-видимому в синтезированных образцах на поверхности находится слой серы, что способствует образованию люминесцирующих примесно-вакансионных диполей VCd-S.

В процессе синтеза наночастиц в растворе путем олигомеризации анионных остатков пивалевой кислоты образуются органические олигомеры, которые при высыхании позволяют закреплять наночастицы CdS на неорганических оптически прозрачных поверхностях.

Синтезированы также наночастицы CdS, и ZnCdS покрытые слоем полиакриловой кислоты, формирующейся при помощи облучения смеси исходных реагентов с водным раствором акриловой кислоты ультрафиолетовым излучением с длиной волны 365 нм, одновременно с



синтезом наночастиц. В спектрах люминесценции наблюдается две изолированных полосы: с максимумами на 690 и 530 нм при возбуждении в области 400 нм. Люминесценция в области 530-560 нм объясняется наличием поверхностных дефектов типа комплексов кислород-вакансия по цинку, т.к. синтез проводился на воздухе без удаления кислорода из растворов, полоса на 690-700 нм – изолированными поверхностными катионными вакансиями. Повышение дефектности наночастиц вследствие введения цинка приводит к тому, что люминесценция может наблюдаться и без стабилизации поверхности полимером. Покрытие полимером приводит также к смещению полосы фосфоресценции в коротковолновую область, и возрастанию ее амплитуды на порядок. Для наночастиц CdS люминесценция в водных растворах не наблюдается.

Наночастицы ZnCdS являются чувствительными к температуре, как по интенсивности, так и по спектральному положению максимума люминесценции. Чувствительность по смещению максимума составляет 0,23 нм/градус.

Люминесцирующие наночастицы, ZnCdS покрытые полимером, находящиеся в воде, могут быть использованы в качестве биологических сенсоров. Зависимость люминесценции от температуры позволяет использовать их в качестве температурных датчиков. Тушение люминесценции перекисью водорода дает возможность использования данных наночастиц для определения концентрации глюкозы в плазме крови глюкооксидазным способом. Возможно также использование данных наночастиц для регистрации структуры биотканей и их коагуляции при фототермической терапии.

1. В.И. Кочубей и др., Химия высоких энергий. **44**, 188 (2010).
2. В.И. Кочубей и др., Оптика и спектроскопия. **109**, 183 (2010).
3. В.И. Кочубей и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. **8**, 40 (2010).
4. Д.И. Кочубей, В.И. Кочубей, Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы. **10**, 3 (2010).
5. В.И. Кочубей и др., Квант. Электроника. **41**, 335 (2011).
6. Е.К. Волкова, Ю.Г. Конюхова, В.И. Кочубей, Оптика и спектроскопия. **115**, 183 (2013).
7. V.I. Kochubey, E.K. Volkova, Ju.G. Konyukhova, J. Biomed. Opt. **19**, 011020 (2013).
8. E.K. Volkova et. al., Proc. SPIE. **8571**, 85712P (2013).
9. Ju.G. Konyukhova et. al., Proc. SPIE. **9031**, 90310K-1 (2014).
10. Ju.G. Konyukhova et. al., Proc. SPIE. **9031**, 90310L-1 (2014).

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ:  
ИСТОРИЯ, СИНТЕЗ, СТРОЕНИЕ,  
НОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Е.С. Климов<sup>1</sup>, А.М. Объедков<sup>2</sup>, Б.С. Каверин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск

<sup>2</sup>Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН,

Нижний Новгород

*E-mail: eugen1947@mail.ru*

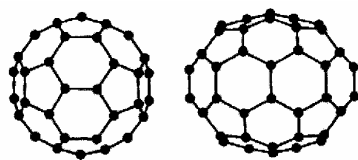
Углеродные нанотрубки стоят в ряду наиболее перспективных наноматериалов благодаря своим уникальным свойствам, обеспечивающим возможность их применения в различных областях науки и техники.

Долгое время считалось, что аллотропных форм углерода три: алмаз ( $sp^3$ -гибридизированный атом углерода), графит ( $sp^2$ ) и аморфный углерод. В 1960 г. была открыта еще одна форма – карбин ( $sp$ ). Авторы открытия – Сладков А.М., Касаточкин В.И., Коршак В.В., Кудрявцев В.П. (Россия). В 1985 г. Kroto H.W., Curl R.F., Smally R.E. фиксируют новую, каркасную форму углерода – фуллерен (Нобелевская премия 1996 г.). В 1991 г. Iijima S. синтезирует углеродные нанотрубки (в 1952 г. углеродные нановолокна наблюдали российские ученые Радужкевич Л.В. и Лукьянович В.М., но не смогли их охарактеризовать). В 2004 г. Гейм А.К. и Новоселов К.С. отделяют от графита двухмерный графен (толщиной в один атом углерода) с совершенно уникальными свойствами (Нобелевская премия 2010 г.). Углерод в графене  $sp^2$ -гибридизирован.

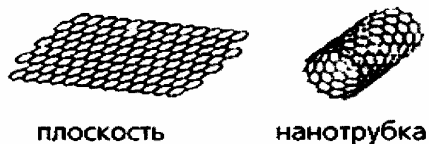
Элементарная ячейка карбина составлена параллельными цепочками углерода, имеющими зигзаги, благодаря которым ячейка оказывается двуслойной. Один слой составляет цепочка из шести атомов углерода.

Фуллерены  $C_{60}$  и  $C_{70}$  – углеродная каркасная структура (рис. 1). Главная их особенность – это каркасная форма: они выглядят как замкнутые, пустые внутри «оболочки». Наиболее симметричной и стабильной фуллереновой молекулой является  $C_{60}$ . В этой молекуле атомы углерода располагаются на сферической поверхности в вершинах 20 правильных шестиугольников и 12 правильных пятиугольников, образуя правильный усеченный икосаэдр. Все 60 атомов абсолютно идентичны и находятся в вершинах двух шестиугольников и одного пятиугольника. Связь между атомами имеет  $sp^2$ -характер.

Оказалось, что углерод может образовывать и так называемые углеродные нанотрубки, имеющие внутренние каналы. Впервые их охарактеризовал Сумио Ииджима при исследовании осадка (макроскопические нити и волокна), образующегося на катоде при распылении графита в электрической дуге.



Фуллерены. Строение молекул  $C_{60}$  и  $C_{70}$



Графеновая плоскость и одностенная углеродная нанотрубка

Рис. 1. Каркасные структуры углерода

Измерения, выполненные с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения (ПЭМВР), показали, что диаметр таких нитей не превышает нескольких нанометров (от 2,5 нм до 30 нм), длина от одного до нескольких микрон. Нити сформированы в несколько слоев, каждый из которых представляет собой гексагональную сетку графита, основу которой составляют шестиугольники с расположенными в вершинах углов атомами углерода. Внутри трубок четко просматривалась центральная полость. Подобные исследования в это же время велись и в России группой Л.А. Чернотанского.

В углеродных нанотрубках связь между углеродными атомами имеет в основном  $sp^2$ -характер. Идеальная одностенная углеродная нанотрубка представляет собой свернутую в цилиндр графеновую плоскость, поверхность которой выложена правильными шестиугольниками, в вершинах которых расположены атомы углерода. Углеродные нанотрубки могут содержать не одну, а несколько стенок. Такие УНТ называются многостенными (МУНТ). Они отличаются от одностенных широким разнообразием форм и конфигураций. Поперечная структура МУНТ имеет две основные разновидности. Первую назвали русской матрешкой: она представляет собой коаксиально вложенные друг в друга однослойные цилиндрические нанотрубки. Вторая напоминает скатанный рулон или свиток. Возможны смешанные формы – «папье-маше». Для этих структур среднее расстояние между соседними слоями близко к графиту, у которого оно составляет 0,335 нм.

Наиболее распространенными методами получения углеродных нанотрубок являются разрядно-дуговой метод и метод осаждения из жидких сред с использованием катализаторов – металлоорганических соединений [1, 2]. При разрядно-дуговом методе в токе инертного газа (гелия) в плазме дугового разряда с графитового электрода снимаются углеродные частицы и осаждаются на поверхности катода в виде сотовых структур. При этом получают, в основном, многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ). Метод энергоемок, требует сложного аппаратного оформления.

Метод осаждения УНТ из жидких сред (ацетона, спирта) проводится разложением смеси углеродсодержащего соединения и катализатора (ацетаты железа, кобальта) в токе аргона при температурах 600-800°C. В полученной саже с небольшим выходом получают одностенные нанотрубки.

Метод осаждения нанотрубок из паровой фазы (метод CVD) заключается в пропускании углеводорода (метан, этилен, ацетилен) над металлосодержащим (никель, кобальт) катализатором при температурах 500-800 °С. Вследствие пассивации поверхности катализатора углеродом выход углеродных нанотрубок невелик.

Одним из наиболее перспективных является метод химического парофазного осаждения (метод MOCVD) УНТ из смесей летучих металлоорганических соединений (металлоцены) и углеводородных прекурсоров (бензол, толуол, ксилол) в токе инертного газа при 650-900 °С, предложенный Рао и сотр. [3]. Использование этого метода позволяет избежать пассивации катализатора и приближает процесс пиролиза к непрерывному. В мировой практике синтеза УНТ эта технология получила большое распространение, однако в России работы в этом направлении немногочисленны [4-6]. Этот метод модифицирован в ИМХ им. Г.А. Разуваева РАН (Г.А. Домрачев, А.М. Обьедков, Б.С. Каверин) и заключается в осаждении УНТ из паровой фазы с использованием в качестве катализатора летучих металлоорганических соединений и прекурсора толуола (ксилола).

Метод позволяет варьировать как прекурсорами, так и геометрий реактора, что позволило нам разработать новую экспериментальную лабораторную установку для синтеза МУНТ с большим выходом (Е.С. Климов и сотр., Ульяновский государственный технический университет) [7]. Схема установки представлена на рис. 2.

Синтез МУНТ осуществляется в токе аргона с использованием в качестве прекурсоров ферроцена и толуола. Основными элементами установки являются две горизонтальные трубчатые печи: испаритель ферроцена и печь для осаждения МУНТ с изотермической зоной 200 мм. Осаждение проводили в кварцевой трубе внешним диаметром 46 мм с размещенными внутри нее тремя цилиндрическими кварцевыми вкладышами диаметром 30 мм и длиной 70 мм. Оптимальные параметры синтеза МУНТ следующие: температура зоны осаждения МУНТ 850 °С, температура испарителя ферроцена 105 °С, расход аргона 850 см<sup>3</sup>/мин, время синтеза 7 ч, средняя скорость осаждения на 3 вкладышах 1,45 г/ч. Масса полученных МУНТ со всего объема реактора составила 10,2 г. В свободном пространстве зоны реактора наблюдается образование длинных переплетенных нитей типа «паутины».

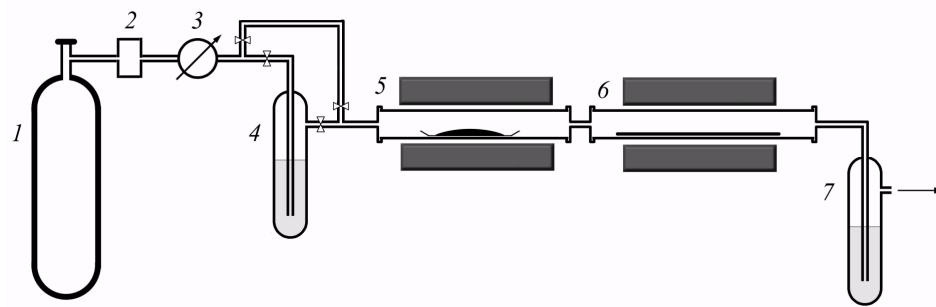


Рис. 2. Лабораторная установка для получения многостенных углеродных нанотрубок: 1 – баллон высокого давления с аргонем; 2 – ресивер; 3 – регулятор расхода газа; 4 – барботер с толуолом; 5 – печь для испарения ферроцена; 6 – печь для осаждения нанотрубок; 7 – водяной затвор.

На всех вкладышах МУНТ формируется в виде массивов (макроцилиндры) с толщиной слоя до нескольких мм. При этом получают изогнутые МУНТ закрытого типа (торцевые полусферы) с включением в углеродные цепочки железа и железо-карбидных структур. Размер МУНТ составляет от 20 до 150 нм в диаметре и увеличивается при росте массива перпендикулярно поверхности вкладыша (рис. 3).



Рис. 3. Микрофотография МУНТ диаметром 40-60 нм (фазовый контраст). Атомно-силовой микроскоп Solver P47-Pro.

По поперечному сечению макроцилиндра можно выделить несколько зон с различной упаковкой МУНТ. В начале МУНТ осаждаются на подложку разориентированно (хаотично). При дальнейшем росте массива образуются ориентированные структуры и верхний слой макроцилиндра представляет собой радиально ориентированные МУНТ с плотной упаковкой (рис. 4).

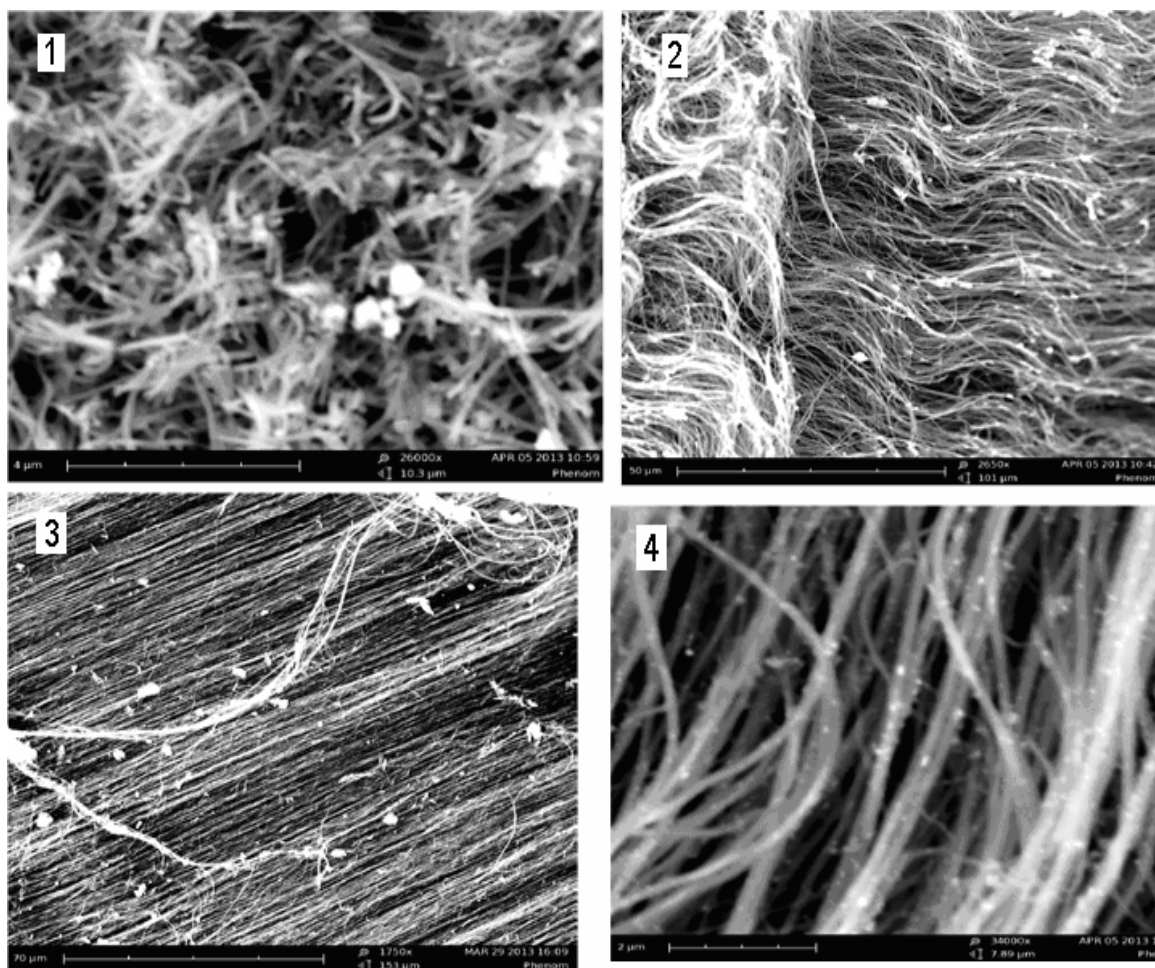


Рис. 4. Ориентация МУНТ:  
 1 – разориентированные; 2 – ориентированные;  
 3 – радиально ориентированные; 4 – ориентированные (усиление 35000).  
 Электронный микроскоп Phenom proX.

Одним из методов модифицирования МУНТ является термообработка (отжиг) на воздухе. Для определения температурных границ окисления МУНТ при нагреве нами применен метод термогравиметрического анализа. Для образцов МУНТ, отобранных с 3 вкладышей, наблюдается практически одинаковая зависимость потери массы от температуры. МУНТ устойчивы к термоокислению до температур 500 °С, максимальная скорость окисления 600 °С (рис. 5). Это говорит о том, что на всех 3 вкладышах при синтезе формируются одинаковые по термоокислительной стабильности МУНТ. Чистота МУНТ составляет более 98 %, о чем свидетельствует отсутствие потери массы в интервале температур 300-400 °С, характерное для аморфного углерода.

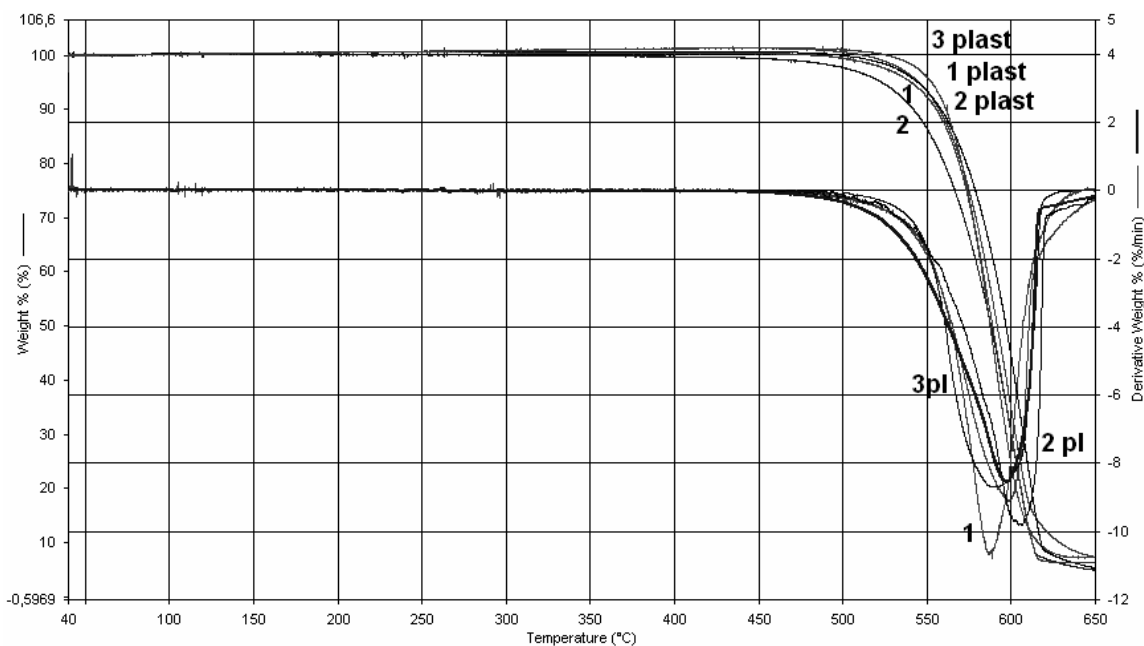


Рис. 5. Профиль потери массы (верхняя кривая) и дифференциальная кривая скорости потери массы (нижняя кривая) для 3 образцов МУНТ. Термовесы Pyris 6TGA.

Проблема создания новых гибридных материалов, в том числе и на основе углеродных нанотрубок (УНТ), является одной из ключевых проблем развития нанотехнологий. Интерес к получению нанокomпозиционных материалов обусловлен тем, что их свойства, в отличие от классических композитов, определяются не суммой свойств составляющих компонентов, а появлению новых свойств, связанных с синергетическим взаимодействием поверхностей на атомном уровне. Среди потенциальных направлений практического применения УНТ следует особо выделить возможности их использования для создания композиционных полимерных и сорбционных материалов, которые могут использоваться в различных областях науки и техники. В частности, введение углеродных наноструктур в матрицу полимера позволяет управлять структурно-реологическими, механическими, физическими и электрическими свойствами композита.

Массивы УНТ можно использовать в качестве наноразмерных полевых эмиттеров, так называемых холодных катодов в эмиссионных приборах, а также в других прикладных областях, в том числе и медицине.

Новым и чрезвычайно перспективным направлением является создание гибридных материалов на основе металлоорганических соединений и МУНТ. Эти работы проводятся в ИМХ им. Г.А. Разуваева РАН (Г.А. Домрачев, А.М. Обьедков, Б.С. Каверин, В.А. Егоров и сотр.). Были получены материалы из МУНТ с покрытиями пиролитического хрома, железа, вольфрама и других металлов [6, 8]. Примеры таких покрытий представлены на рис. 6,7.

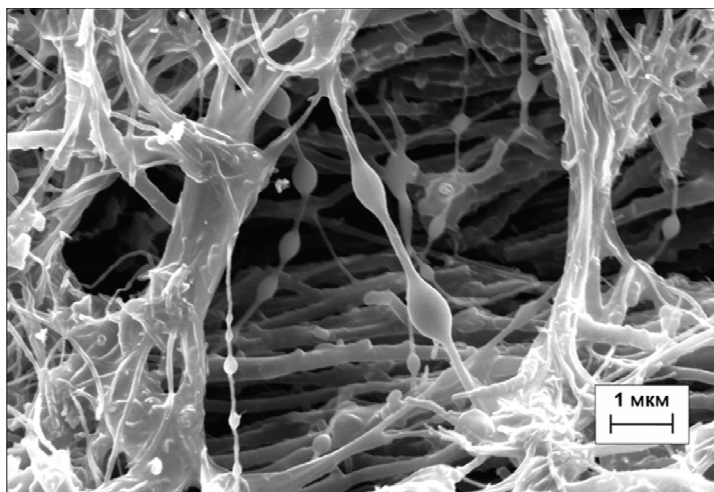


Рис.6. РЭМ микрофотография образца гибридного материала из МУНТ с нанесенным покрытием пиролитического хрома.

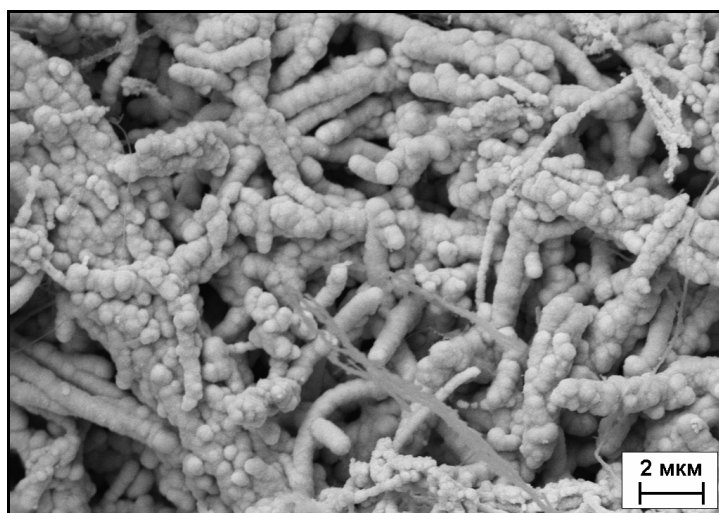


Рис. 7. РЭМ микрофотография образца гибридного материала из МУНТ с покрытием пиролитического железа.

В последние годы поток публикаций в области практического применения УНТ резко наращивается, что уже приносит реальные результаты при создании новых композиционных материалов с уникальными свойствами.

1. Э.Г. Раков, Успехи химии. **69**, 41 (2000).
2. Э.Г. Раков, Рос. хим. ж. **5**, 12 (2004).
3. R. Sen, A. Govindaraj, C.N.R. Rao, Chem. Phys. Lett. **267**, 276 (1997).
4. Ю.В. Корнеева, А.А. Новакова, А.М. Объедков и др., Поверхность. **7**, 5 (2007).
5. А.М. Объедков, Б.С. Каверин, С.А. Гусев и др., Поверхность. **7**, 61 (2009).



6. В.А. Егоров, *Новые гибридные материалы на основе углеродных нанотрубок*: Дис. ... канд. хим. наук. Н. Новгород, 163 с. (2012).
7. Е.С. Климов, А.А. Лукьянов, Е.С. Ваганова и др., *Материалы 12 Межд. конф. «Нано-, микро-, оптоэлектроника и волоконная оптика: физические свойства и применение»*. Саранск, 22 (2013).
8. А.М. Обьедков, А.А. Зайцев, Г.А. Домрачев и др., *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. **1**, 83 (2007).

# НАНОКРИСТАЛЛЫ Ge В МАТРИЦАХ SiO<sub>2</sub> И Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ПОЛУЧЕННЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ОТЖИГОМ: ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА

Д.А. Грачев, А.В. Ершов, А.В. Пирогов, Д.А. Павлов

*Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [grachov@phys.unn.ru](mailto:grachov@phys.unn.ru)*

Оптические и электронные свойства ансамблей нанокристаллов Ge и SiGe в диэлектрических матрицах интенсивно обсуждаются в литературе [1] с связи с высокой их технологической совместимостью. Нами предпринята попытка синтеза систем с ансамблями нанокристаллов Ge в оксидных матрицах SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом высокотемпературного отжига многослойных нанопериодических систем; проведен анализ их структурных и люминесцентных свойств.

Исходные многослойные структуры были получены методом вакуумного испарения из отдельных источников, аналогично тому как это описано в [2]. Толщины слоев варьировались в диапазоне 5 – 15 нм, в то время как общее число слоев составляло 10 – 30 периодов. Термический отжиг при 600 – 800 °С в течение 1 часа в атмосфере азота. Структурные особенности наномасштаба установлены путем получения и анализа изображений электронной микроскопии высокого разрешения аналогично тому. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) измерялись в одинаковых условиях при комнатной температуре в диапазоне длин волн 380 – 900 нм.

В результате высокотемпературного отжига формировались плотноупакованные массивы германиевых нанокристаллов (в срезе не менее 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>), размер которых определялся исходной толщиной слоев Ge неотожженных МНС. Вариация температуры отжига позволила наблюдать как минимум два типичных пика на спектрах ФЛ, приходящиеся на 2.3 и 2.9 эВ для температур отжига 600 – 800 и 800 – 900 °С соответственно.

В докладе обсуждаются общие моменты и особенности в структурных и оптических свойствах, а также технологические аспекты направленной модификации отжигом германиевых и кремниевых наноструктур в разных диэлектрических матрицах, полученных путем термообработки многослойных нанопериодических структур. Отмечаются преимущества германиевых нанокристаллов с точки зрения пониженной температуры формирования нанокристаллов и высокой эффективной диэлектрической проницаемости.

1. E.G. Barbagiovanni, D.J. Lockwood, P.J. Simpson et al., J. Appl. Phys. **111**, 034307 (2012).
2. A.V. Ershov, D.A. Pavlov, D.A. Grachev et al., Semiconductors. **48**, 1, 42-45 (2014).

# ДИСЛОКАЦИОННАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В КРЕМНИИ: ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ БОРОМ И АТМОСФЕРЫ ОТЖИГА

Д.С. Королев, А.Е. Смирнов, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.Н. Шушунов,  
Д.И. Тетельбаум

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: dmkorolev@phys.unn.ru*

Перспективным направлением развития современной оптоэлектроники является создание эффективных излучателей в диапазоне длин волн 1,5 – 1,6 мкм, соответствующем окну прозрачности диоксида кремния. Формирование таких излучателей на базе Si отвечает требованию совместимости с существующими базовыми технологиями микроэлектроники. Одним из путей создания таких излучателей служит использование дислокационной люминесценции (ДЛ) кремния в полосе D1 (~ 1,5 мкм). Проблема состоит в недостаточной интенсивности люминесценции. Поэтому нахождение способов ее усиления является актуальной научно-технической задачей.

Ранее нами было установлено, что в кремнии, в котором ДЛ в полосе D1 получена путем имплантации ионов  $\text{Si}^+$  и отжига в окислительной хлорсодержащей атмосфере (ОХСА), дополнительная имплантация ионов бора и отжиг при 800 °С приводит к усилению ДЛ [1], которое зависит от дозы  $\text{B}^+$  и предположительно обусловлено изменением состава дефектно-примесной атмосферы дислокации, ответственной за наблюдаемую ДЛ.

В данной работе исследовано влияние ионной имплантации бора при различных дозах, а также влияние условий отжига на интенсивность ДЛ.

Образцы кремния облучались ионами  $\text{Si}^+$  с энергией 100 кэВ и дозой  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ , а затем отжигались в ОХСА при 1100 °С (1 ч). После отжига образцы облучались ионами  $\text{B}^+$  с дозами  $1 \cdot 10^{15}$ – $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и отжигались при 600–800 °С (0,5 ч,  $\text{N}_2$ ). С целью установления влияния атмосферы отжига образцы кремния марок КЭФ-4.5 и КДБ-1, имплантированные ионами  $\text{Si}^+$  были отожжены при 1100 °С (0,5 ч) в смешанной атмосфере ( $\text{N}_2 + \text{O}_2$ ) с различным содержанием компонентов в газовой смеси.

Установлено, что при температурах отжига 600–700 °С интенсивность ДЛ спадает с ростом дозы  $\text{B}^+$ . После отжига при 800 °С наблюдается увеличение интенсивности ДЛ, наибольшее ее значение достигается при дозе  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Обнаружено, что интенсивность ДЛ после отжига в смешанной атмосфере зависит от типа подложки и содержания кислорода в атмосфере отжига. Результаты обсуждаются с точки зрения влияния ионного легирования и условий отжига на дефектно-примесный состав атмосфер дислокаций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-02-00980).

1. А.Н. Михайлов и др., ФТП. **48**, 212 (2014).

## МЕХАНИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Н.А. Бунаков<sup>1</sup>, С.Н. Потапов<sup>2</sup>, Д.В. Козлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский государственный университет, Ульяновск

<sup>2</sup>ООО НПП «Металл-композит», Ульяновск

E-mail: na\_bunakov@mail.ru

Металломатричный композиционный материал алюминий-углеродные нанотрубки является перспективным материалом для многих приложений.

Открытие в 1991 г. углеродных нанотрубок (УНТ) вызвало большое количество исследований, посвященных свойствам и применению этой модификации углерода в широком спектре областей науки и промышленности. Выдающиеся механические характеристики (предел прочности ~ 300 ГПа, модуль Юнга ~ 1000 ГПа) в сочетании с малой плотностью (~1,8 г/см<sup>3</sup>) и нанометровыми размерами позволяют рассматривать углеродные нанотрубки как перспективный армирующий компонент. При этом использование в качестве матрицы алюминия и его сплавов может привести к появлению нового, сверхлегкого и прочного материала.

Для получения композитов на основе алюминия, упрочненных углеродными нанотрубками широко используются методы порошковой металлургии. Однако, основной проблемой является необходимость равномерного распределения нанотрубок в объеме матрицы. В связи с высокой поверхностной энергией УНТ склонны к слипанию и образованию агломератов.

Таким образом, цель настоящего исследования, изучение влияния технологических параметров изготовления композитов Ал/УНТ на распределение УНТ в матрице алюминия, и достижение равномерного распределения УНТ в матрице.

Формирование композиции Ал/УНТ происходило путем обработки исходных порошков в планетарной мельнице при различных режимах, с последующим компактированием и спеканием при различных температурах.

Для оценки микроструктуры образцов применялся метод сканирующей электронной микроскопии с целью определения степени однородности распределения УНТ.

Таким образом, определен оптимальный режим изготовления композиции Ал/УНТ с равномерным распределением УНТ в алюминиевой матрице без образования агломераций.

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

В.А. Сергеев<sup>1,2</sup>, И.В. Фролов<sup>1</sup>, А.А. Широков<sup>1</sup>, Е.С. Ваганова<sup>2</sup>,  
О.А. Давыдова<sup>2</sup>, М.В. Бузаева<sup>2</sup>, Е.С. Климов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Ульяновск

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск  
E-mail: [ilya-frolov88@mail.ru](mailto:ilya-frolov88@mail.ru)

Углеродные нанотрубки благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам получают все большее распространение во многих областях науки и техники, в том числе и в микроэлектронике [1]. Модифицирование МУНТ (диаметр 40-80 нм) проводили отжигом на воздухе с последующей обработкой соляной кислотой и функционализацией поверхности смесью азотной и серной кислот.

Проведено исследование зависимости удельного электрического сопротивления  $\rho$  массива МУНТ от температуры и механического давления на постоянном токе. Образцы МУНТ помещались в полую керамическую трубку с одним неподвижным электродом. В качестве второго электрода использован медный стержень, на который закреплен груз известной массы. Керамическая трубка размещена в нагревателе.

Исследованы пять образцов МУНТ: 1 – исходные; 2 – после отжига; 3 – после отжига с обработкой HCl; 4 – после отжига с обработкой кислотами; 5 – после обработки кислотами. Значения  $\rho$  образцов при комнатной температуре и давлении 65 кг/см<sup>2</sup> представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения удельной электропроводности образцов МУНТ

№ образца	1	2	3	4	5
$\rho$ , мОм·см	55,4	55,6	139	223	205

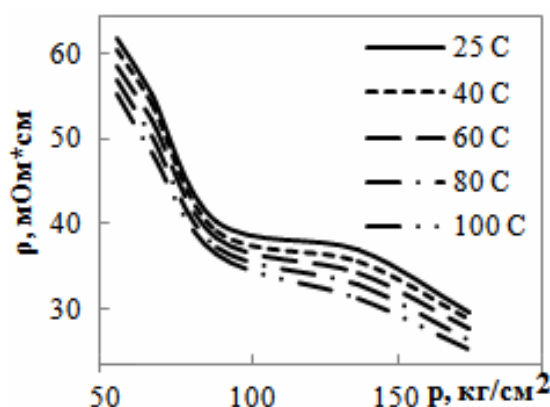


Рис. 1. Зависимости  $\rho(P)$  исходных МУНТ при различных температурах.

На рис. 1 представлены графики зависимости удельного сопротивления массива исходных МУНТ от механического давления  $\rho(P)$  при различных температурах. По величине удельного электрического сопротивления и характеру зависимости от температуры (спад с увеличением температуры) исходные МУНТ относятся к полупроводникам.

1. А.А. Лукьянов, Е.С. Ваганова, О.А. Давыдова, Е.С. Климов, *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. №5, 131-132 (2013).

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В СИСТЕМАХ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Д.М. Жигунов<sup>1</sup>, Н. В. Латухина<sup>2</sup>, М.В. Степихова<sup>3</sup>, В.Ю. Тимошенко<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва  
<sup>2</sup>Самарский государственный университет, Самара  
<sup>3</sup>Институт физики микроструктур, Нижний Новгород  
E-mail: [latuhina@samsu.ru](mailto:latuhina@samsu.ru)

Системы кремниевых нанокристаллов (nc-Si) с редкоземельными элементами (РЗЭ) считаются одной из наиболее перспективных систем для создания светоизлучающих приборов на кремниевой подложке. Легированные эрбием ансамбли кремниевых нанокристаллов (nc-Si) в матрице диоксида кремния [1]. В таких структурах реализуется уникальное свойство nc-Si с высокой вероятностью передавать энергию электронного возбуждения расположенным рядом ионам и молекулам. В данной работе такая система была создана на базе наноструктурированного пористого кремния (ПК) с внедренными ионами РЗЭ. Пористый слой создавался электрохимическим травлением монокристаллических пластин кремния. Внедрение ионов РЗЭ осуществлялось заполнением пор водным раствором соли РЗЭ, после чего проводился отжиг образцов при температуре от 800°C до 1200°C. Исследование элементного состава образцов показывает, что при такой технологии концентрация РЗЭ в верхнем слое толщиной в десятки доли микрометра составляет не менее  $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [2,3]. Структуры показывают хорошие люминесцентные свойства при комнатной температуре, не проявляя обычного в таких случаях концентрационного гашения люминесценции, так как примесь распределена по большой площади внутренней поверхности пористого слоя. Предлагаемые структуры имеют невысокое удельное сопротивление и допускают возбуждение люминесценции электрическим полем. Интенсивная электролюминесценция структур с эрбием в диапазоне 1500 – 1550 нм при комнатной температуре наблюдалась при их обратном смещении напряжением порядка 15-17 В. Таким образом, можно сделать вывод, что данные структуры перспективны для приборного приложения.

1. П.К. Кашкаров и др., ФТТ, **46**, 1, 105 (2004).
2. Н.В. Латухина, В.М. Лебедев, Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. **1** (53), 7 (2011).
3. М.И. Дроздов, Н.В. Латухина, М.В. Степихова и др. Известия ВУЗов. Материалы электронной техники, **4**(64), 9 (2013).

# МОДИФИЦИРОВАНИЕ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА, ДОПИРОВАННОГО ЗОЛОТОМ, ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А.С. Липатьев<sup>1</sup>, С.В. Лотарев<sup>1</sup>, Т.О. Гельманова<sup>1</sup>, В.И. Савинков<sup>1</sup>,  
Г.Ю. Шахгильдян<sup>1</sup>, П.Г. Казанский<sup>1,2</sup>, В.Н. Сигаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Международный центр лазерных технологий РХТУ им Д.И. Менделеева,  
Москва*

<sup>2</sup>*Университет Саутгемптона, Саутгемптон  
E-mail: [lipatievas@yandex.ru](mailto:lipatievas@yandex.ru)*

Стекла, содержащие ионы благородных металлов, представляют интерес с точки зрения формирования плазмонных наноструктур для разработки сверхбыстрых оптических переключателей, затворов и модуляторов благодаря резкому увеличению кубической оптической нелинейности материала при формировании в нем металлических наночастиц вследствие эффекта поверхностного плазмонного резонанса. Облучение фемтосекундным лазерным пучком позволяет осуществить управляемый локальный рост наночастиц металлов в стеклах. До сих пор в большинстве исследований предлагались двухстадийные методики формирования наночастиц металлов, включающие восстановление ионов металлов до нейтральных атомов под лазерным пучком на первой стадии и агрегацию и рост металлических наночастиц при термообработке в печи на второй стадии [1]. Недавно продемонстрировано формирование наночастиц меди и серебра в стекле в одну стадию под действием фемтосекундного пучка с частотой следования импульсов 250 кГц [2].

Мы использовали фемтосекундный регенеративный усилитель ТЕТА-100, излучающий импульсы длительностью до 300 фс с энергией до 110 мкДж и частотой следования до 100 кГц на длине волны 1030 нм, для локального модифицирования оптического фосфатного стекла, допированного золотом. Показано, что под действием лазерного излучения с частотой следования импульсов 1 кГц в стекле образуются области с измененным показателем преломления, содержащие дефекты структуры (центры окраски), которые окрашивают стекло в розовый цвет и исчезают при термообработке при 300°C в течение 20 минут. Однако при облучении с частотой следования импульсов от 25 до 100 кГц нам впервые удалось получить рост наночастиц золота в монолитном стекле, которые также придавали стеклу розовую окраску, в данном случае обусловленную поверхностным плазмонным резонансом и устойчивую к термообработке. Наночастицы формировались в области лазерного нагрева стекла, но вне зоны непосредственного воздействия пучка.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант №14.Z50.31.0009) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-03-31587).

1. J. Shin et al. Applied Physics A. **93**(4), 923-927 (2008).
2. Teng Yu et al. Journal of Non-Crystalline Solids. **357**, 2380-2383 (2011).

# РОСТ СЛОЕВ ТВЕРДОГО РАСТВОРА $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(100)$ С НИЗКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ДИСЛОКАЦИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

С.А. Матвеев<sup>1</sup>, С.А. Денисов<sup>1</sup>, В.Ю. Чалков<sup>1</sup>, М.В. Степихова<sup>2</sup>,  
В.Г. Шенгуров<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>1</sup>, Ю.Н. Дроздов<sup>2</sup>, З.Ф. Красильник<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,

Нижний Новгород

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

E-mail: matveevsa.sou@gmail.com

Рост эпитаксиальных слоев SiGe на кремниевых подложках методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) привлекает большое внимание, как с точки зрения приборных приложений, так и фундаментальных исследований. Когда толщина слоя SiGe превышает критическую, напряжение в слое частично релаксирует за счет генерации дислокаций несоответствия на границе раздела Si/SiGe. Высокая плотность дислокаций простирается в эпитаксиальный слой. Использование специальных буферных слоев с градиентным изменением состава способствует улучшению качества слоев SiGe, однако плотность дефектов в таких слоях все же высока. Кроме того, их большая толщина (несколько микрометров) затрудняет интеграцию в приборные схемы и создает трудности при проведении литографии. В данной работе сообщается о выращивании эпитаксиальных слоев SiGe с низкой плотностью дислокаций на кремниевых подложках методом МПЭ при низкой температуре. Образцы были выращены с использованием сублимирующего источника Si и паров германия, формируемых при напуске в камеру роста газа моногермана ( $\text{GeH}_4$ ). Слои SiGe толщиной  $d = 0,5 - 2,5$  мкм выращивались при  $T_S = 250 - 550^\circ\text{C}$ . Содержание германия варьировалось от  $x = 0,2$  до  $x = 0,4$ . В ряде случаев слои SiGe легировались атомами эрбия путем испарения их из источника Si:Er. В работе приводятся данные просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеновской дифракции (РД), спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ) выращенных структур.

Установлено, что наилучшее структурное совершенство слоев SiGe достигается при температурах роста  $T_S = 325 - 350^\circ\text{C}$ , шероховатость поверхности слоев составляет единицы нанометров ( $\text{RMS} = 1,5$  при  $T_S = 325^\circ\text{C}$  и  $\text{RMS} = 3,6$  при  $T_S = 350^\circ\text{C}$ ). Данные ПЭМ показали, что при таких низких температурах роста дислокации локализуются на границе буфер(Si)/слой(SiGe) и не прорастают дальше к поверхности, обеспечивая, таким образом, рост бездефектных слоев SiGe. Более того, при низких температурах роста ( $T_S = 350^\circ\text{C}$ ) наблюдается максимальный сигнал ФЛ структур Si/SiGe:Er.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 14-02-31370 мол\_а.



СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВ  $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Yb}_x\text{Er}_y\text{F}_{2+x+y}$

М.Н. Маякова<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, П. П. Федоров<sup>1</sup>, А.В. Рябова<sup>1</sup>,  
Д.В. Поминова<sup>1</sup>, В.В. Воронов<sup>1</sup>, А.Е. Баранчиков<sup>2</sup>, В.К. Иванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии

им. Н.С.Курнакова РАН, Москва

E-mail: [mn.mayakova@gmail.com](mailto:mn.mayakova@gmail.com)

Интерес к исследованию нанофторидов стремительно возрос за последние несколько лет. Фториды перспективны как компоненты просветляющих оптических покрытий, для создания нового поколения сцинтилляторов, в качестве шихты для получения лазерной керамики и монокристаллов и для медицинских приложений.

Целью данной работы было исследование синтеза и люминесцентных характеристик порошков  $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Yb}_x\text{Er}_y\text{F}_{2+x+y}$ . Легирование проводилось с целью создания люминофора обладающего высокой ап-конверсионной эффективностью преобразования излучения ИК диапазона (970-980 нм) в видимый.

На основе выбранной матрицы получены однофазные образцы. Отработана методика синтеза образцов: выявлены зависимости параметров синтезируемых порошков от условий синтеза и отработаны условия последующей термообработки порошков. Фазовый состав образцов исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА). На основе данных РФА проводился расчет параметров решетки, а также областей когерентного рассеяния. Методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследована морфология частиц. Проведены исследования квантового выхода люминесценции частиц легированных парами  $\text{Yb}^{3+}$ - $\text{Er}^{3+}$  при возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны 974 нм.

# ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКСИАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ НА СИНТЕЗ НАНОКРИСТАЛЛОВ СОСТАВА $A^{II}B^{VI}$

В.Е. Мешков, В.А. Сухарев, А.П. Садовский, И.Х. Аветисов

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Москва

E-mail: [glaymonter@gmail.com](mailto:glaymonter@gmail.com)

Полупроводниковые нанокристаллы соединений класса  $A^{II}B^{VI}$  являются перспективными материалами для современной электроники, в частности светоизлучающих приборов и приемников излучения. Люминесцентные свойства квантовых точек (КТ) зависят от различных параметров, в большей степени от размера самих точек, материала на поверхности и метода синтеза.

В [1] было показано, что применение аксиальных низкочастотных вибраций (АНВ) приводит к изменению структурных и термодинамических характеристик расплава. В настоящей работе исследовали влияния АНВ на синтез водорастворимых КТ на основе CdTe.

КТ синтезировали по методике [2]. АНВ организовывали в системе посредством погруженного в раствор цилиндрического диска из тефлона, гармонически осциллирующего с частотой от 10 до 60 Гц и амплитудой 10-500 мкм. Установлено, что введение АНВ ( $A=200$  мкм,  $f=10$  Гц) приводило к смещению максимума пика люминесценции КТ на 45-50 нм в красную область. Увеличение интенсивности АНВ свыше некоторого критического значения приводило к полному разрушению прекурсоров на начальной стадии синтеза.

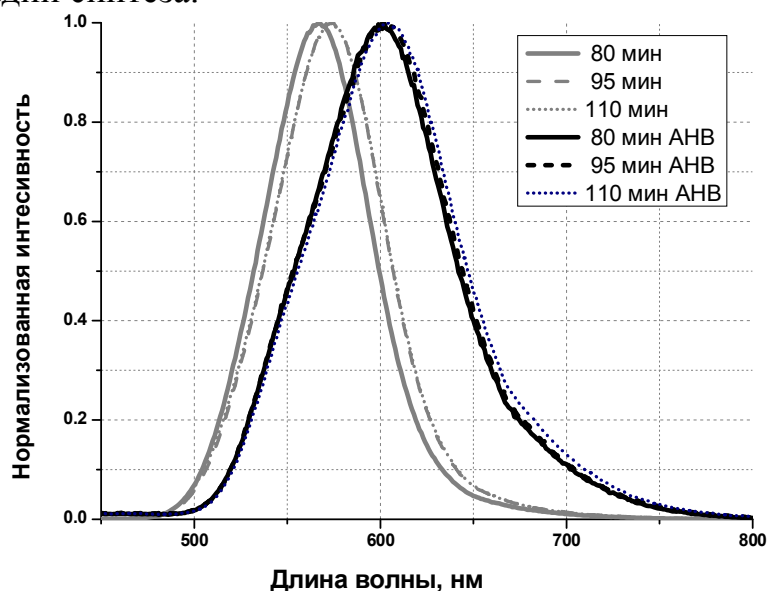


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции КТ на основе CdTe.

1. I. Avetissov, A. Sadovskiy, S. Belov et al., CrystEngComm, **15**, 2213, (2013).
2. Rong He et al. Front.Chem.China **3**(3), 325, (2008).

# СПЕКТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПРОПУСКАНИЯ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ПОЛИМЕРНОМ СВЯЗУЮЩЕМ

В.А. Сергеев<sup>1,2</sup>, А.А. Черторийский<sup>1,2</sup>, Д.К. Подымало<sup>2</sup>, А.М. Низаметдинов<sup>1,2</sup>,  
Е.С. Ваганова<sup>2</sup>, О.А. Давыдова<sup>2</sup>, М.В. Бузаева<sup>2</sup>, Е.С. Климов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский филиал института радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновск

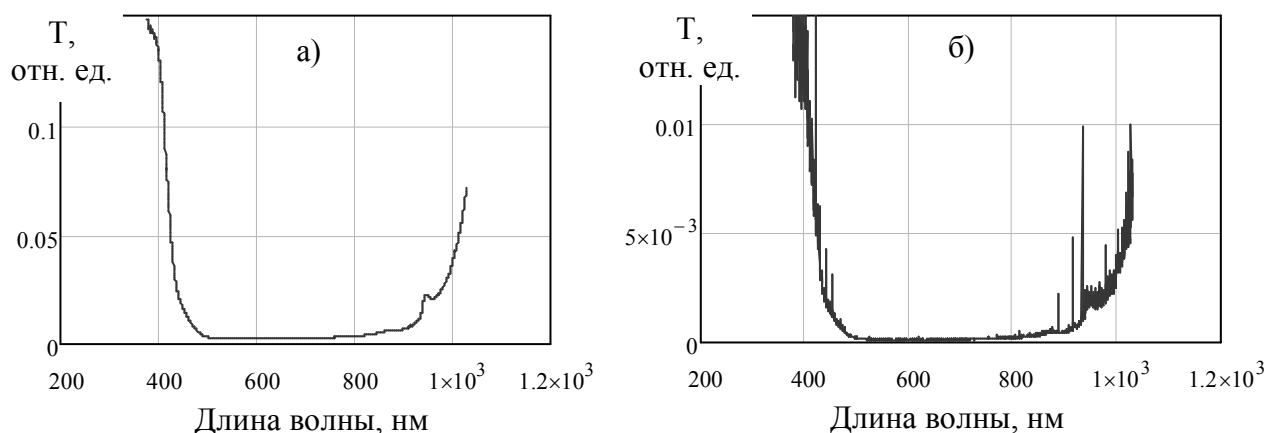
<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск  
E-mail: [anizametdinov@yandex.ru](mailto:anizametdinov@yandex.ru)

Исходные многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) диаметром 40-80 нм получены авторами методом МOCVD в токе аргона с использованием прекурсоров толуола и ферроцена.

Для исследования оптических свойств МУНТ измерялись спектры оптического пропускания дисперсий МУНТ в бисфенол-А эпоксивинилэфирной смоле, полученные при ультразвуковой обработке смесей. Каждая проба помещалась в индивидуальную кювету толщиной 5 мм из органического стекла. В качестве источника излучения использовалась галогеновая лампа. Спектры пропускания измерялись с помощью спектрофотометра USB2000+ фирмы OceanOptics.

Результаты измерений подтвердили возможность использования предложенной методики для изучения оптических свойств подобных систем. На рис. 1 показаны спектры пропускания 0.5 % (масс.) дисперсии МУНТ в смоле. Спектры нормированы относительно пропускания чистой смолы. Сравнение спектров показывает, что для нанотрубок после отжига на воздухе (450°C, 50 мин) и обработки HCl (2.5 Н, 20 ч) пропускание излучения значительно (более чем в 10 раз) превышает тот же параметр для исходных МУНТ. Интересно, что в обоих случаях наблюдается уменьшение поглощения излучения в УФ- и ИК- областях спектра.

Описанная методика исследований может представлять интерес при изучении свойств наноструктурированных полимерных материалов.



а) МУНТ после отжига; б) МУНТ без отжига

Рис. 1 – Спектры пропускания дисперсии МУНТ в смоле.

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ СУЛЬФИДА КАДМИЯ В МАТРИЦЕ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА

Д.С. Путырский<sup>1,2</sup>, Ю.В. Кузнецова<sup>1</sup>, А.А. Ремпель<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург*

<sup>2</sup>*Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России*

*Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

*E-mail: [dima\\_putyrskii@mail.ru](mailto:dima_putyrskii@mail.ru)*

В настоящее время активно исследуются диэлектрические матрицы, содержащие люминесцентные полупроводниковые наночастицы. Эта проблема актуальна для получения новых функциональных материалов и последующего их применения в различных областях нанотехнологий, включая нано- и оптоэлектронику.

В данной работе проводилось компьютерное моделирование наночастиц сульфида кадмия в матрице силикатного стекла. Модель была построена на основе ранее полученных данных по малоугловому рассеянию рентгеновских лучей на образце стекла, содержащем наночастицы CdS [1,2].

Результаты малоуглового рассеяния рентгеновских лучей свидетельствовали о том, что в матрице стекла статистически расположены наночастицы сульфида кадмия со средним размером 5 нм и логарифмическим распределением по размерам, а форма наночастиц близка к сферической.

Построенная на основе этих данных компьютерная модель дала наглядное представление о внутренней структуре образца и позволила определить среднее расстояние между поверхностями ближайших наночастиц, которое оказалось равным 15 нм для заданной объемной концентрации нанопазы. Такое расстояние достаточно, чтобы отсутствовал электрический контакт между наночастицами, а исследованное силикатное стекло с наночастицами сульфида кадмия являлось полезным для практики люминесцентным материалом.

Авторы благодарны за финансовую поддержку УрО РАН (проект 12-П-234-2003) и КЦП УрФУ «Радиационная физика функциональных материалов».

1. Y.V. Kuznetsova, A.A. Rempel, A. Magerl, Abstract book of the XII International Conference on Nanostructured Materials "NANO 2014", July 13-18, 2014 Moscow, Russia
2. В.В. Волков, *Определение формы частиц по данным малоуглового рентгеновского и нейтронного рассеяния: методическое пособие*, М.: Изд. РАН, 2009. – 51 с.

# Ab-initio МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКЗОЭДРАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК С ЛИТИЕМ

С.А. Созыкин, В.П. Бескачко

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

E-mail: [sergey.sozykin@gmail.com](mailto:sergey.sozykin@gmail.com)

Электронная структура индивидуальных углеродных нанотрубок (УНТ) существенно изменяется, когда они образуют адсорбционные комплексы со сторонними атомами или молекулами. Адсорбционные комплексы УНТ с литием (Li-УНТ) рассматриваются в перспективе создания нового поколения литий-ионных батарей и водородных хранилищ. В литературе имеются структурные и энергетические параметры, характеризующие эндоэдральные комплексы Li-УНТ в широком диапазоне концентраций Li [1], тогда как сведения об экзоэдральных комплексах ограничены лишь случаем малых концентраций (~1 ат. %) [2]. Этой информации совершенно недостаточно, поскольку в циклах зарядки – разрядки концентрация Li должна изменяться от весьма малой до предельно возможной (отвечающей, по некоторым оценкам, составу LiC<sub>2</sub>). В представленной работе мы попытались восполнить недостающую информацию об электронной структуре экзоэдральных комплексов Li-УНТ с помощью ab initio методов компьютерного моделирования.

При моделировании использовался реализованный в пакете SIESTA метод функционала электронной плотности. Моделируемый фрагмент УНТ (7,7) состоял из 112 атомов углерода с  $n=1\div 9$  атомами лития на его внешней поверхности.

Результаты расчета плотности электронных состояний ( $DOS(E,n)$ ) рассматриваемых комплексов  $nLi-(7,7)$ , свидетельствуют о том, что вид функции  $DOS(E,n)$  слабо зависит от  $n$  для  $E$  в окрестности уровня Ферми ( $E_F$ ). При  $n=0$  этот уровень располагается посередине зонной щели, отделяющей валентную зону от зоны проводимости. При увеличении  $n$  возрастает концентрация носителей заряда на трубке, что приводит к смещению уровня Ферми в направлении зоны проводимости. При  $n = 1$  и  $2$  ( $DOS(E_F,n)$ ), как функция  $n$ , слегка увеличивается, мало отличаясь от  $DOS(E_F,0)$ , составляющей для индивидуальной нанотрубки 1,2 состояния/эВ. При  $n = 3\div 5$   $DOS(E_F,n)$  возрастает до 8,1 состояния/эВ, а при  $n = 7$  немного уменьшается - до 7 состояний/эВ. При дальнейшем увеличении  $n$   $DOS(E_F,n)$  продолжает монотонно увеличиваться. Описанное поведение свидетельствует о том, что влияние лития сводится к увеличению плотности носителей заряда на нанотрубке без существенного изменения профиля плотности электронных состояний.

3. S.A. Sozykin, V.P. Beskachko, *Molecular Physics* **111**, 930-938 (2013).
4. M. Khantha, et al., *Phys. Rev. B* **78**, 115430 (2008).

МОРФОЛОГИЯ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СПЕКТРАЛЬНО-  
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОПОРОШКОВ  
 $Y_{1-x}Yb_xPO_4:Er$

С.А. Антошкина<sup>1</sup>, А.С. Ванцев<sup>2</sup>, О.М. Гайтко<sup>3</sup>, В.М. Кяшкин<sup>1</sup>,  
А.В. Маркин<sup>4</sup>, А.А. Панов<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, Е.В. Тютяев<sup>1</sup>, С.Н. Ушаков<sup>5</sup>,  
Н.А. Пятаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

<sup>2</sup>*Institute of Physics, University of Tartu, Tartu*

<sup>3</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова, Москва

<sup>4</sup>Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,  
Саратов

<sup>5</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: [anabel-2005@yandex.ru](mailto:anabel-2005@yandex.ru)

В настоящей работе представлены результаты исследований концентрационного ряда наноразмерных кристаллов ортофосфатов составов  $Y_{1-x}Yb_xPO_4:Er$  ( $x=0; 0,25; 0,5; 0,75$ ), а также их гидратов.

Интерес к данному типу соединений обусловлен простым методом их синтеза, обеспечивающим монодисперсность и низкую степень агрегации, а также возможностью получения люминесценции в различных диапазонах спектра путем варьирования типа легирующего РЗ иона. Данные свойства, а также высокая фотостабильность по сравнению с органическими красителями, позволяют рассматривать наноразмерные кристаллы ортофосфатов в качестве потенциальных кандидатов для использования в биологии и медицине. Легирование данных материалов ионами  $Er^{3+}$  и  $Yb^{3+}$  позволяет получить люминесценцию при возбуждении излучением ближней ИК области спектра, которое попадает в «окно прозрачности» биообъектов.

В работе приведены результаты фазового анализа указанного концентрационного ряда наноразмерных кристаллов, изучена их структура и морфология методами рентгеновской дифрактометрии, МУРР, СЭМ и ПЭМ.

Также приведены результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик данных объектов методами спектроскопии диффузного отражения, комбинационного рассеяния света, ИК-фурье спектроскопии и люминесцентными методами, в ходе которых были выявлены особенности спектров люминесценции ионов  $Er^{3+}$  в указанных выше соединениях.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОГО МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ

А.А. Панов<sup>1</sup>, Е.С. Ваганова<sup>2</sup>, О.А. Давыдова<sup>2</sup>, М.В. Бузаева<sup>2</sup>, Е.С. Климов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск

E-mail: aapanov@uandex.ru

Свойства многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в существенной мере зависят от технологических параметров режима осаждения и методов модифицирования трубок. Синтез МУНТ проводили в токе аргона на разработанной в УЛГТУ экспериментальной установке методом МОСVD в токе аргона с использованием прекурсоров толуола и ферроцена. МУНТ осаждали в изотермической зоне трубчатой печи на цилиндрических подложках при 850°C. С целью придания активности модифицирование МУНТ проводили несколькими методами: отжиг на воздухе с последующей обработкой соляной кислотой; функционализация поверхности смесью азотной и серной кислот.

Исследования МУНТ методом рентгеновского малоуглового рассеяния (РМУ) проводились на приборе Necus S3-MICRO. Использовалось  $\text{Cu K}_\alpha$  излучение (с длиной волны  $\lambda=1.542 \text{ \AA}$ ) на установке с коллиматором Кратки.

Кривые распределения, представленные на рис. 1, представляют собой вероятность нахождения рассеивающих объектов в образце в заданном интервале радиусов инерции  $R_g$ . Для образцов МУНТ<sub>исх</sub>, МУНТ<sub>отж</sub>, МУНТ<sub>отж HCl</sub> и МУНТ<sub>отж HCl кислоты</sub> максимум объемного распределения находится в диапазоне 13-19 Å. Для образца МУНТ<sub>кислоты</sub> максимум сдвинут в большие значения радиусов инерции, в область 53 Å. При этом распределения для всех образцов имеют сильно ассимметричный вид. Такой результат можно объяснить присутствием в образцах структурных элементов превалирующего размера (радиуса МУНТ) и наличием рассеивающих областей со значением радиуса инерции до 400 Å (длина УНТ).

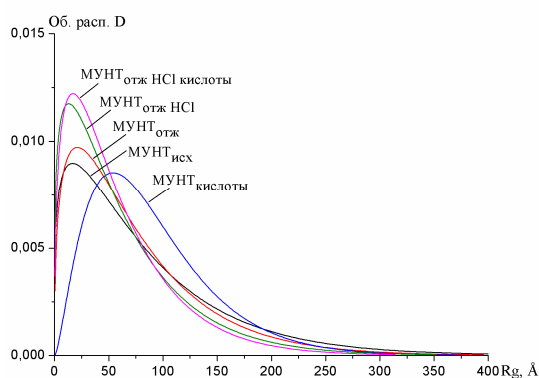


Рис. 1. Объемное распределение структурных образований в МУНТ по радиусу инерции  $R_g$ .

## ЭВОЛЮЦИЯ АНСАМБЛЯ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ИТТРИЯ В ПРОЦЕССЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Р.П. Ермаков<sup>1</sup>, В.В. Воронов<sup>2</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: [ermakov@fo.gpi.ru](mailto:ermakov@fo.gpi.ru)

Изучение процессов эволюции ансамбля наночастиц является важнейшей фундаментальной задачей современного материаловедения с глубоко развитыми корнями практического применения. Технологический прием изотермического отжига наноструктурированных порошков находит многогранное применение в поле науки и производства, как наиболее простой метод трансформации микроструктуры порошков. Важнейшим параметром микроструктуры является распределение частиц по размерам. Изучение эволюции распределения нанокристаллитов в процессе изотермического воздействия связано с необходимостью рассмотрения механизмов их взаимодействия на наноуровне и установления соответствующей кинетики роста частиц. В рамках настоящей работы в качестве модельного материала был взят нанокристаллический оксид иттрия, на примере которого на базе нашей лаборатории было получено экспериментальное подтверждение существования эффекта когерентного срастания нанокристаллитов.

Цель настоящей работы состояла в установлении кинетики роста кристаллитов по механизму когерентного срастания путем изучения динамики распределения частиц по размерам ( $f(D,t)$ ,  $D$  – диаметр кристаллита, нм,  $t$  – время, с) в процессе изотермического отжига. Установление вида функции распределения областей когерентного рассеяния по размерам проводилось на основе рентгенодифракционных порошковых методов путем проведения полнопрофильного моделирования. Анализ накопленного экспериментального материала позволил построить модель эволюции ансамбля частиц на базе кинетического уравнения коагуляции Смолуховского:

$$\frac{\partial f(V_c, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^{V_c} K(V_c - V, V) f(V_c, t) f(V, t) dV - \int_0^{\infty} K(V_c, V) f(V_c, t) f(V, t) dV \quad (1)$$

где  $K(V_c, V)$  – вероятность взаимодействия двух частиц объемами  $V$  и  $V_c$  в единицу времени.

Установление явного вида функции  $K(V_c, V)$ , а также численное решение уравнения (1) по методу Рунге-Кутты позволяет установить механизм взаимодействия частиц, а также делать предсказания поведения функции распределения по размерам в процессе термического воздействия. Следует добавить, что подобный подход к анализу кинетик роста нанокристаллов проделан впервые и представляет собой логическое продолжение существующих моделей ориентационного срастания нанокристаллитов.



## АП-КОНВЕРСИОННЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ SrF<sub>2</sub>:Yb:Er

Ю.А. Рожнова<sup>1</sup>, А.А. Лугинина<sup>2</sup>, С.В. Кузнецов<sup>3</sup>, П.П. Федоров<sup>3</sup>,  
В.В. Воронов<sup>3</sup>, А.В. Рябова<sup>3</sup>, Д.В. Поминова<sup>3</sup>, В.В. Арбенина<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт радиоэлектронной техники МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, Москва

<sup>2</sup>Всероссийский институт научной и технической информации РАН,  
Москва

<sup>3</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>4</sup>Московский государственный университет тонких химических  
технологий им. М.В. Ломоносова, Москва

E-mail: [julia.r89@mail.ru](mailto:julia.r89@mail.ru)

Исследованию люминесцентных ап-конверсионных характеристик нанопорошков на основе фторидов посвящено значительное количество публикаций, что обусловлено их уникальным набором физико-химических свойств и различными областями применения в науке и технике. Нанопорошки фторидов перспективны для использования в качестве шихты для изготовления лазерной керамики методом горячего прессования, для биомедицинских приложений, источников белого света. В тоже время в литературе имеется пробел по исследованию ап-конверсионных люминесцентных характеристик и методики синтеза нанопорошков на основе фторида стронция, легированного Yb<sup>3+</sup> и Er<sup>3+</sup>, заполнение которого составляет главную задачу настоящей работы.

Методом соосаждения из водных растворов с использованием водяной бани при температуре 60-65°C при использовании нитрата стронция, нитратов редкоземельных элементов, фторида аммония и фтороводородной кислоты были синтезированы нанопорошки SrF<sub>2</sub>:Yb:Er со структурой флюорита. Общее содержанием редкоземельных элементов варьировалось в широком диапазоне концентраций (2.5 – 30 мол.%). Было замечено, что существенное влияние на морфологию и размеры кристаллитов полученных образцов оказывает выбор фторирующего агента, величина избытка этого агента и концентрация редкоземельных элементов.

При исследовании люминесцентных характеристик были определены оптимальные составы ап-конверсионных люминофоров, которые могут обеспечить ап-конверсионную люминесценцию с квантовым выходом более 5% при плотности мощности накачки 1 Вт/см<sup>2</sup> при лазерном возбуждении на 974 нм.

Методом горячего прессования был получен образец прозрачной керамики из шихты номинального состава Sr<sub>0.82</sub>Yb<sub>0.15</sub>Er<sub>0.03</sub>F<sub>2.18</sub>. Оптические, теплофизические и люминесцентные свойства полученного керамического образца в настоящее время подвергаются всестороннему изучению.

# РЕЗОНАТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ ФАБРИ-ПЕРО С АКТИВНЫМ СЛОЕМ, СОДЕРЖАЩИМ МАССИВЫ НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

А.С. Балашов, Д.А. Грачев, А.В. Ершов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [alex067067@yandex.ru](mailto:alex067067@yandex.ru)*

Главный недостаток кремния как основного материала современной электроники – непрямозонность его энергетической структуры и низкая эффективность люминесценции, что затрудняет использование кремния при создании активных оптоэлектронных элементов – источников и приемников излучения, световодных усилительных структур.

Возможным решением проблемы повышения излучательной эффективности непрямозонного кремния считается переход от «объемного» кремния к нанокристаллическому. Массивы нанокристаллов кремния проявляют интенсивную люминесценцию при комнатной температуре, что открывает возможности создания планарных оптоэлектронных схем. Сужение полосы люминесценции возможно с помощью резонаторных структур, простейшей из которых можно считать плоский микрорезонатор Фабри-Перо.

В данной работе были получены резонаторные структуры с активным слоем, содержащим нанокристаллы кремния. В качестве плоского резонатора Фабри-Перо использовались многослойные интерференционные распределенные брэгговские отражатели. Массивы нанокристаллов были сформированы путем высокотемпературного отжига многослойных нанопериодических структур  $\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$ , полученных вакуумным испарением из отдельных источников.

В работе представлены результаты по модификации спектра фотолюминесценции массивов нанокристаллов кремния в диэлектрической матрице путем применения их в качестве активной среды плоского резонатора Фабри-Перо с многослойными интерференционными распределенными брэгговскими отражателями. Спектры фотолюминесценции измерялись при комнатной температуре в диапазоне длин волн 650-900 нм при возбуждении импульсным Nd:YAG лазером с рабочей длиной волны 532 нм, угол накачки был около  $45^\circ$ . Сигнал детектировался фотоумножителем ФЭУ-62 при использовании решеточного монохроматора SP-150.

Продемонстрированы эффекты сужения спектра излучения до 25 нм и многократное увеличение интенсивности излучения вдоль оси резонатора.

# МОДИФИЦИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.В. Бузаева<sup>1</sup>, Е.С. Климов<sup>1</sup>, О.А. Давыдова<sup>1</sup>, К.В. Кочеткова<sup>1</sup>,  
В.В. Светухин<sup>2</sup>, Д.В. Козлов<sup>2</sup>, Е.С. Пчелинцева<sup>2</sup>, Н.А. Бунаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск

<sup>2</sup>Ульяновский государственный университет, Ульяновск

*E-mail: m.buzaeva@mail.ru*

Синтез МУНТ проводили на разработанной нами экспериментальной лабораторной установке, которая включала две горизонтальные трубчатые печи (испаритель ферроцена и печь для осаждения МУНТ). Осаждение проводили в токе аргона, в кварцевой трубе с размещенными внутри нее тремя цилиндрическими кварцевыми вкладышами [1]. Для придания необходимых свойств МУНТ необходимо модифицировать, в частности, отжигом на воздухе для снятия торцевых полусфер и дефектов поверхности. Изменение топологии поверхности приведено на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Микрофотографии МУНТ: а) расщепление жгута МУНТ при 470 °С; б) жгут МУНТ после отжига (50 мин) и обработки HCl (20 ч). Phenom proX.

Значительной проблемой при использовании наноматериалов является высокая адгезия МУНТ друг к другу. Поэтому, модифицирование сорбентов проводили под действием ультразвука, варьируя в водной дисперсии содержание МУНТ и сорбента. Оптимальное соотношение по массе составляет 0,1-0,5 % МУНТ от массы сорбента. Исследования сорбционной способности модифицированного цеолита по отношению к ионам тяжелых металлов показали, что степень извлечения ионов цинка и меди из загрязненных растворов достигает 98 %.

1. Е.С. Климов, А.А. Лукьянов, Е.С. Ваганова и др., Материалы 12 Межд. конф. «Нано-, микро-, оптоэлектроника и волоконная оптика: физические свойства и применение». Саранск, 22 (2013).

# ВЛИЯНИЕ СОСТАВА АЗОТНО-КИСЛОРОДНОЙ СРЕДЫ ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ Ge В МАТРИЦАХ SiO<sub>2</sub> И Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Е.А. Суroveгина, Д.А. Грачев, А.В. Ершов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: surovegina\_ka@mail.ru*

Применение непрямозонных объемных материалов электроники Si или Ge, ограничено принципиальной проблемой создания эффективных светоизлучателей [1]. Однако массивы нанокристаллов непрямозонных полупроводников проявляют интенсивную люминесценцию при комнатной температуре, что открывает возможности создания планарных оптоэлектронных схем.

В данной работе были получены многослойные (до 20 слоев) нанопериодические (период до 20 нм) структуры a-Ge/диэлектрик (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) методом поочередного испарения в вакууме из отдельных источников. Исследовано влияние высокотемпературного отжига (500-1000 °C) в атмосфере смеси газов кислорода и азота в разных объемных пропорциях (0:1; 0.1:0.9; 0.2:0.8 соответственно) на фазовые и люминесцентные характеристики. Спектры фотолюминесценции измерялись при комнатной температуре в диапазоне длин волн 350-900 нм при возбуждении импульсным азотным лазером.

Структурно-фазовая модификация многослойных нанопериодических структур под действием отжига устанавливалась на основании спектров ИК пропускания. Установлено, что диапазон температур формирования нанокристаллов Ge, проявляющих люминесценцию при комнатной температуре, лежит выше 600 °C. Обнаружено изменение стехиометрии «барьерных» диэлектриков. Отмечается, что высокие температуры отжига (900 °C) приводят к формированию Ge соединений, таких как SiGe независимо от состояния атмосферы.

Экспериментально продемонстрировано управление положением пика на спектрах люминесценции в диапазоне длин волн 400-650 нм, а также изменение интенсивности полосы люминесценции при вариации температуры отжига и состава атмосферы. Обсуждается факт, что содержание кислорода 20% во время отжига близко к оптимальному для получения интенсивной фотолюминесценции.

1. M. Fukuda, *Optical semiconductor devices*, NY: N.Y. Wiley, 1999.

## ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ПЕРЕХОДНЫХ СЛОЕВ В МДП-СТРУКТУРАХ

А.М. Гурьянов

Самарский государственный архитектурно-строительный университет,  
Самара

E-mail: [gurjanovam@mail.ru](mailto:gurjanovam@mail.ru)

Методами отражательной эллипсометрии определялись свойства переходных слоев, возникающих на границах диэлектрических пленок оксидов редкоземельных элементов (ОРЗЭ) в кремниевых МДП-структурах. Исследовались МДП-структуры с пленками оксидов иттрия, скандия, гольмия, эрбия, гадолиния, диспрозия толщиной 30-90 нм. Измерения проводились на установке, выполненной на базе эллипсометра ЛЭФ-772. Погрешность определения показателя преломления составляла не более 0,002, а толщины пленки не хуже 0,5 нм.

Основное уравнение эллипсометрии  $tg \psi \exp(i\Delta) = R_p/R_s$  позволяет по измеренным углам  $\psi$  и  $\Delta$  в рамках выбранной модели отражающей поверхности определить толщину и показатель преломления пленки на подложке с известными характеристиками. Решались прямая и обратная задачи эллипсометрии. Для определения модели отражающей поверхности структуры пленка ОРЗЭ – кремниевая подложка проводились измерения с пленками ОРЗЭ переменной толщины (показатель преломления пленки считался постоянным). Установленной моделью отражающей поверхности структуры пленка ОРЗЭ – кремниевая подложка является модель однородной прозрачной пленки на поглощающей подложке с двумя переходными слоями. В рамках установленной модели определены оптические параметры (показатель преломления и толщина) переходных слоев. Одним из переходных слоев является поверхностный слой двуоксида кремния на кремниевой подложке (слой естественного оксида кремния или выращенного термическим окислением кремниевых пластин). Вторым переходным слоем толщиной 2÷6 нм состоит из ОРЗЭ и оксида кремния с некоторым избытком редкоземельного металла. Элементный состав его выражается формулой  $R_{2+x}Si_{1-y}O_5$  (R–символ химического элемента). Рассматривалось влияние толщины переходного слоя на определение толщины и показателя преломления пленки ОРЗЭ.

В рамках установленной модели отражающей поверхности решалась обратная задача эллипсометрии. По измеренным эллипсометрическим углам рассчитывались показатель преломления  $n$  и толщина пленок ОРЗЭ, а также показатели преломления и толщины первого и второго переходных слоев, что можно рассматривать как решение задачи о минимизации функционала, зависящего от параметров отражающей поверхности.

Значения толщин диэлектрических пленок и параметры переходных слоев на границе диэлектрик-полупроводник являются важными факторами, влияющими на электрофизические характеристики МДП-структур с диэлектрическими пленками ОРЗЭ.

# СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОШКА ФТОРИДА БАРИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЦЕРИЕМ, КАК ШИХТЫ ДЛЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ КЕРАМИКИ

М.Н. Маякова<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>, В.В. Воронов<sup>1</sup>,  
Р.П. Ермаков<sup>1</sup>, Е.А. Гарибин<sup>2</sup>, П.Е. Гусев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*ЗАО ИНКРОМ, Санкт-Петербург*

*e-mail: [mn.mayakova@gmail.com](mailto:mn.mayakova@gmail.com)*

В последние годы сформировалась новая область исследований – синтез и изучение нанофторидов. Свойства, проявляемые наноматериалами, а также уникальный набор физико-химических свойств фторидов обуславливают возможности использования нанопорошков фторидов в различных областях науки и техники. Порошки фторидов интересны как компоненты просветляющих оптических покрытий, в качестве шихты для получения лазерной керамики, монокристаллов, для биомедицинских приложений, перспективны для создания нового поколения сцинтилляторов, источников белого света.

Данная работа посвящена синтезу и исследованию шихты для фторидной сцинтилляционной керамики на основе фторида бария легированного церием.

Фторид бария является одним из наиболее перспективных и активно исследуемых быстрых сцинтилляторов является фторид бария. В монокристаллическом фториде бария наблюдаются коротковолновая полоса остово-валентных переходов около 220 нм, обладающая сверхбыстрой люминесценцией ( $\tau = 0.8$ нс) и широкая экситонная полоса люминесценции с максимумом около 300 нм, которая характеризуется медленным высвечиванием ( $\tau = 600-800$  нс). Именно быстрая люминесценция представляет особый интерес для физики высоких энергий и медицинских приложений. При добавлении редкоземельных элементов, например церия, в матрицу фторида бария происходит увеличение интенсивности сверхбыстрого компонента и тушение медленного компонента.

Не менее важной задачей для получения качественного керамического материала является использование шихты требуемого гранулометрического состава и морфологии. Синтез методом соосаждения из водных растворов позволяет решить эту задачу путем варьирования таких параметров синтеза как тип фторирующего агента, скорость реакции, температура растворов и др. Синтезированы образцы на основе фторида бария с различным содержанием церия в качестве легирующей добавки. Исследованы фазовый состав и морфология синтезированных порошков. Для полученных образцов керамики проведены исследования спектров рентгенолюминесценции, получены значения интегрального световыхода быстрой и медленной компонент. Отмечено тушение медленного компонента и увеличение интенсивности сверхбыстрого компонента люминесценции фторида бария. Отмечено влияние изменений условий синтеза на соотношение интенсивности люминесценции быстрой и медленной компонент.

# **ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА**

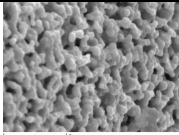
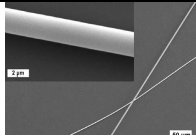
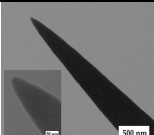
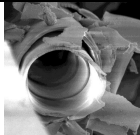
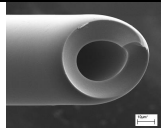
# NANO-AND MICROSHAPING OF OPTICAL MATERIALS FOR ADVANCED APPLICATIONS

I. Sildos, V. Kiisk; T. Tätte

*Institute of Physics, University of Tartu, Tartu*

Sol-gel technology occurs to be surprisingly flexible wet-chemistry method for preparation of pure and doped oxide materials in various morphologies. Typical precursors are metal alkoxides which undergo hydrolysis and polycondensation to form a sol. Sol-gel processing provides various technologically important nanocrystalline or amorphous oxide materials due to functional shaping, doping flexibility to achieve needed optical or mechanical quality. Viscoelastic properties of the precursor, ambient conditions, deposition rate and thermal treatments can be controlled very carefully to ensure repeatable results.

Materials prepared:

SnO <sub>2</sub> ; Re/TiO <sub>2</sub> nanopowders	TiO <sub>2</sub> microfibers	SnO <sub>2</sub> nanoneedles	ZrO <sub>2</sub> microrolls	YSZ microtubes
				

Applications of prepared materials:

**Nanopowders.** Powders have very large surface-to-volume ratio. Doping with rare earth (RE) ions yields phosphors for lamps and LEDs. Re-doped materials can be used as optical gas sensors [1, 2].

**Optical micro- and nanofibers.** Oxide fibers can be obtained by pulling a jet off the metal-alkoxide concentrate with suitable viscoelastic properties diameters, down to 200 nm fibres can be achieved. Fibres can be easily doped for luminescence applications by introducing rare earth (RE) impurities adding corresponding salts [3].

**Nanoneedles.** Pinching of alkoxide jets yields nanometer-sharp tips. Materials like SnO<sub>2</sub>:Sb have simultaneous optical and electrical conductivity, potentially suitable as a probe for combined STM-SNOM microscopy[4].

**Microtubes.** Jets of alkoxide precursor can self-hollow if left in air atmosphere at high humidity. Industrially important material Y-stabilized ZrO<sub>2</sub> (YSZ) can be prepared capable of working above 1000°C. Using as micro size fuel cells, as for micro thermometry[5].

1. Kiisk et al., Mat. Chem. Phys. **130**, 293 (2011).
2. Reedo et al., Proc. SPIE **5946**, 59460F (2005).
3. Tätte et al., Sci. Technol. Adv. Mater. **12**, 034412 (2011).
4. T. Tätte, T. Avarmaa, R. Lohmus, U. Maeorg et al., Mater. Science and Engineering C **19**, 101 (2002).
5. K. Utt, M. Part, T. Tätte et al., J. of Lumin. **152**, 125 (2014).



## СЕЛЕКЦИЯ МОД ГИБРИДНОГО СВЕТОВОДА

С.С. Алешкина<sup>1</sup>, М.Е. Лихачев<sup>2</sup>, М.В. Яшков<sup>2</sup>, М.М. Бубнов<sup>1</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Научный центр волоконной оптики РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [sv\\_alesh@fo.gpi.ru](mailto:sv_alesh@fo.gpi.ru)*

В работе [1] нами была впервые предложена конструкция цилиндрически симметричного гибридного световода. Главным преимуществом структуры была возможность смещения нуля дисперсии в область длин волн менее 1 мкм при низком уровне потерь на распространение рабочей моды. Профиль световода представлял собой сердцевину ( $n_{\text{сердц}} > n_{\text{SiO}_2}$ ), окруженную одним (или несколькими) оптически более плотным кольцевым слоем (ОБПС) и одним депрессированным слоем ( $n_{\text{депресс.слоя}} < n_{\text{SiO}_2}$ ). Недостатком конструкции оставалась возможность распространения в структуре мод ОБПС, доля интенсивности которых частично была локализована в области сердцевины.

В [2] нами была предложена методика достижения квазиодномодового режима распространения гибридного световода, основывающаяся на различии пространственного распределения моды сердцевины и мод ОБПС. Идея методики заключалась в том, что введение тонких сильно поглощающих слоев ( $\alpha \sim 1000$  дБ/м) в положения минимумов интенсивности рабочей моды практически не влияет на уровень ее потерь, но приводит к существенному погашению мод ОБПС, имеющих в этой области ненулевое значение поля. При этом с практической точки зрения в случае световодов с несколькими ОБПС введение поглощающего лиганда между кольцевыми слоями видится более оправданным. Минимум интенсивности рабочей моды, локализованный между ОБПС, существенно меньше изменяет свое пространственное положение при изменении длины волны распространяющегося света, а, следовательно, менее чувствителен к вариациям диаметра световода.

В настоящей работе экспериментально продемонстрирована возможность селекции мод гибридного световода. Заготовка гибридного световода была реализована MCVD-методом. Тонкий поглощающий слой был изготовлен методом пропитки, путем введения в сетку стекла ионов  $\text{Sm}^{3+}$ . Из заготовки был вытянут световод с внешним диаметром 120 мкм и диаметром поля рабочей моды 5,7 мкм. Исследование модового состава показало наличие в сердцевине только гибридной моды  $\text{LP}_{03}$ . Мод оптически более плотных кольцевых слоев на длинах волн поглощения самария обнаружено не было.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента МК-5947.2014.2

2. S.S. Aleshkina et al., *Opt. Express* **21**, 23838 (2013).

3. S.S. Aleshkina, *Proc. SPIE 8961, Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications*, 89610U (March 7, 2014).

# ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ОКСИДА ЦЕРИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, АКТИВИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ

А.А. Пыntenков<sup>1</sup>, К.Н. Ницев<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

<sup>2</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

E-mail: [alekspyn@yandex.ru](mailto:alekspyn@yandex.ru)

Целью работы являлось изучение влияния окислительно-восстановительных условий синтеза на спектрально-люминесцентные свойства висмут-германатных оптических стекол.

Проведено исследование влияния примеси оксида церия (от 0 до 4 ат.%) на оптические свойства активных центров, формирующихся в германатных стеклах, активированных висмутом (1 мол.%). Обнаружено, что введение церия приводит к монотонному снижению уровня поглощения активных центров и фонового поглощения. Обнаружено, что фоновое поглощение спадает медленнее, чем поглощение активных центров на длине волны 500 нм. Исходя из полученных данных

$$\frac{\alpha_{\text{peak}}^{500}}{\alpha_{\text{peak}}^{700}} \approx \frac{\alpha_{\text{bg}}^{500}}{\alpha_{\text{bg}}^{700}} \approx \text{const}$$

определено соотношение:

Данное отношение свидетельствует о принадлежности полос поглощения на 500 и 700 нм одному активному висмутовому центру, а также об одной природе происхождения фонового поглощения на 500 и 700 нм.

Получены зависимости величины поглощения активных центров и фонового поглощения от температуры синтеза стекол. Показано, что синтез стекла при температурах выше 1600 °С приводит к резкому возрастанию фонового поглощения, тогда как уровень активного поглощения сохраняется.

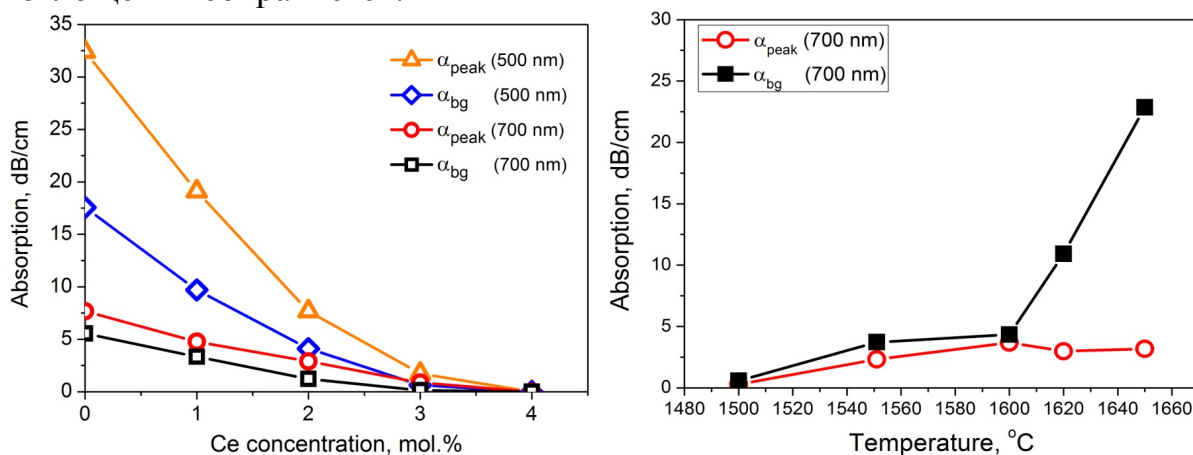


Рис. 1. Зависимости изменения величины поглощения: слева – в основных пиках на 500, 700 нм и их пьедесталах от концентрации церия, справа – в пике и пьедестале на 700 нм от температуры синтеза.

КЛЮЧЕВАЯ РОЛЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ СОСТОЯНИЯ  
С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА  
В МЕХАНИЗМЕ ФОТООКРАШИВАНИЯ ФОСФОРСИЛИКАТНЫХ И  
АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ  
СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДОМ ИТТЕРБИЯ

А.А. Рыбалтовский<sup>1</sup>, К.К. Бобков<sup>1</sup>, В.В. Вельмискин<sup>1</sup>,  
А.А. Умников<sup>2</sup>, И.А. Шестакова<sup>3</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>2</sup>,  
М.Е. Лихачев<sup>1</sup>, М.М. Бубнов<sup>1</sup>, Е.М. Дианов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН,  
Нижний Новгород

<sup>3</sup>НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва

E-mail: [wittkoss@gmail.com](mailto:wittkoss@gmail.com)

Фотопотемнение иттербиевых волоконных световодов при длительном воздействии ИК-излучения накачки является основным фактором, ограничивающим их применение в волоконных усилителях. Установлено, что этот эффект обусловлен поглощением кислородно-дырочных центров («oxygen hole centers», ОНС) [Ошибка! Источник ссылки не найден., 2, 3]. Механизм наведения ОНС при воздействии квантов гамма- или УФ-излучения с энергией  $> 6$  эВ описан в литературе [4, 5], однако до сих пор не представлено удовлетворительного объяснения механизма наведения ОНС при воздействии на сетку стекла ИК-квантов с энергией 1.3 эВ. Предполагается, что наведение центров окраски при воздействии ИК-излучения накачки происходит вследствие возбуждения ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в состояние переноса заряда («charge-transfer state», CTS) [6], в результате чего образуется пара дефектов «ион  $\text{Yb}^{2+}$  - ОНС». Основной целью настоящей работы являлась экспериментальная проверка данной гипотезы.

В настоящей работе были проведены сравнительные исследования спектров поглощения и люминесценции образцов заготовок с сердцевиной из фосфоросиликатного и алюмосиликатного стекла, легированного оксидом иттербия, а также кристалла  $\text{Yb:YAG}$ . Экспериментально было продемонстрировано, что под воздействием УФ-излучения ионы  $\text{Yb}^{3+}$  в стекле могут возбуждаться в состояние с переносом заряда. Установлено, что в образцах стекла, подвергнутых воздействию ИК-излучения, часть ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в результате процесса переноса заряда восстанавливается до двухвалентного состояния.

Таким образом, получены убедительные доказательства гипотезы о ключевой роли возбуждения состояния с переносом заряда в механизме

фотопотемнения фосфоросиликатных и алюмосиликатных световодов, легированных оксидом иттербия.

1. A. A. Rybaltovsky et al., Quantum Electronics. **41**, 1073 (2011).
2. T. Arai et al., Proc. SPIE. 7914, 0K (2011).
3. A. A. Rybaltovsky et al., Quantum Electronics. **43**, 1037 (2013).
4. F. Sim et al., Journal of Chemical Physics. **95**, 4215 (1991).
5. A. S. Zyubin et al., Journal of Chemical Physics. **119**, 11408 (2003).
6. M. Engholm et al., Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. **7195**, 71950T (2009)

# СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ПО РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

П.Ф. Кашайкин<sup>1,2</sup>, М.Ю. Салганский<sup>3</sup>, К.Н. Нищев<sup>2</sup>, А.Л. Томашук<sup>1</sup>,  
Е. М. Дианов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>МГУ им Н. П. Огарёва, Саранск

<sup>3</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН,  
г. Нижний Новгород

E-mail: [kpf@fo.gpi.ru](mailto:kpf@fo.gpi.ru)

Радиационно-стойкие волоконные световоды (ВС) необходимы для работы в условиях повышенного радиационного фона. Прежде всего, это применения в атомной энергетике, космосе, в вооружениях и военной технике, а так же в различных научно-технических областях.

В данной работе было проведено сравнение радиационной стойкости лабораторных образцов ВС, изготовленных в НЦВО РАН совместно с ИХВВ РАН [1] с некоторыми зарубежными коммерческими аналогами ВС. На рис.1 представлена эволюция радиационно-наведенного поглощения в зависимости от времени облучения и релаксации для исследуемых ВС. Световоды облучались на  $\gamma$ -источнике  $Co^{60}$  в течение 180 минут, а в течение 30 минут после завершения облучения измерялись наведенные потери при релаксации. Из графика видно, что величина наведенного поглощения в наших световодах в 4-5 раз меньше, чем для зарубежного аналога при максимальной поглощенной дозе 94 кГр (180 мин облучения).

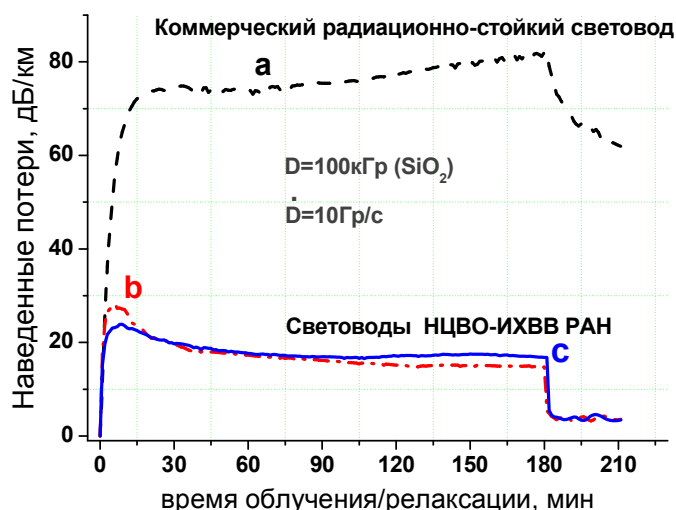


Рис. 1. Зависимость радиационно-наведенного поглощения от времени облучения и релаксации на длине волны 1.31 мкм при мощности дозы 8,7 Гр/с.

а)-зарубежный радиационно-стойкий световод;

б,с)-световоды, изготовленные НЦВО РАН совместно с ИХВВ РАН.

1. А.Л.Томашук, М.Ю.Салганский, П.Ф.Кашайкин, В.Ф.Хопин, А.Б.Пнев, В.Е.Карасик, А.Н. Гурьянов, Е.М.Дианов, Заявка на патент РФ № 201314198, 13.09.2013 г.

# РЕЗОНАНСНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ИЗГИБНЫХ ПОТЕРЬ В ПОЛЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВОДАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КРИВИЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБОЛОЧКИ

А.Н. Колядин<sup>1</sup>, Г.К. Алагашев<sup>1</sup>, А.Ю. Луковкин<sup>1,2</sup>, А.Ф. Косолапов<sup>1</sup>,

А.Д. Прямиков<sup>1</sup>, А.С. Бирюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики Российской академии наук, Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва

E-mail: [kolyadin@fo.gpi.ru](mailto:kolyadin@fo.gpi.ru)

Полые микроструктурированные световоды являются новым типом оптических волоконных световодов, сердцевина в которых имеет меньший показатель преломления по сравнению с оболочкой, так что локализация света происходит не по принципу полного внутреннего отражения.

В полом микроструктурированном световоде при обычных условиях реальная и мнимая часть эффективного показателя преломления у основной моды сердцевины и у мод оболочки отличаются. Именно благодаря отличию реальной части уменьшается связь между модами, и возможно осуществление распространения света с малыми потерями. Однако при определённом изгибе световода реальные части основной моды и мод оболочки могут совпасть [1]. При этом происходит фазовый синхронизм и более активный обмен энергией между этими модами. Т.к. потери у мод оболочки как правило выше чем у основной, то при этом происходит резонансное увеличение потерь основной моды световода (рис.1 а).

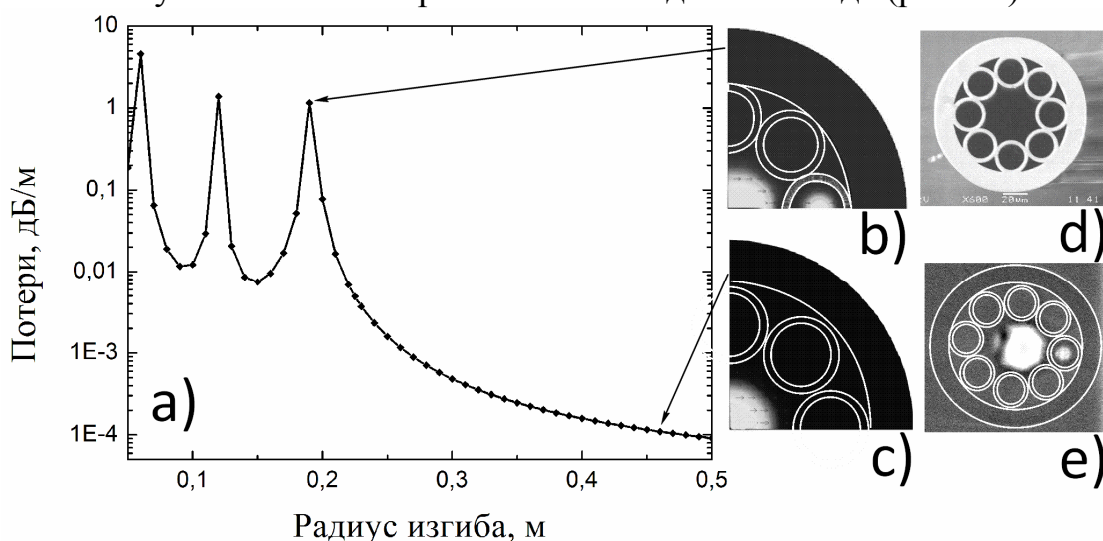


Рис. 1. а) - Расчётные потери основной моды в зависимости от радиуса изгиба световода; б) и с) - расчетное распределение поля основной моды при разных радиусах изгиба; д) - фотография торца световода; е) - экспериментальное наблюдение резонансной связи поля моды сердцевины и капилляра при изгибе. На рисунках б), с) и е) дополнительно указаны контуры световода.

1. A.D. Pryamikov et al., Optics Express. **19**, 1441 (2011).

# УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ ЗАГОТОВОК АКТИВНЫХ КВАРЦЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ПУТЕМ СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ ОКСИДОВ

В.В. Вельмискин, О.Н. Егорова, Д.Ю. Ерин, А.К. Сенаторов, С.Г. Черноок,  
С.Л. Семёнов, Е.М. Дианов

*Научный центр волоконной оптики РАН, Москва*

*E-mail: [vvv@fo.gpi.ru](mailto:vvv@fo.gpi.ru)*

Волоконные лазеры, обладая высокой эффективностью, стабильностью оптических характеристик и компактностью, в основном базируются на световодах, легированных ионами редкоземельных элементов. Использование традиционных технологий для изготовления активных лазерных световодов существенно затрудняется, особенно при попытках понизить показатель преломления активного материала для получения световодов с большим диаметром поля моды. Это побудило к поиску новых и усовершенствованию некоторых старых вариантов получения оптических материалов.

В работах [1,2] описан разработанный и опробованный нами вариант метода создания заготовок активных кварцевых волоконных световодов путем спекания крупнодисперсных порошков оксидов, позволивший получить образцы активного материала на основе кварцевого стекла с величиной оптических потерь ниже 100 дБ/км. Используемая нами методика уменьшения оптических и концентрационных неоднородностей в спеченном материале до субмикронных размеров продемонстрировала хорошие результаты. Но лежащий в ее основе способ многократных перетяжек и консолидации оптического материала оказался все-таки достаточно трудоемким и длительным по времени. Поэтому нами был разработан и реализован новый вариант методики уменьшения неоднородностей, детали которого будут представлены в презентации.

В ходе работы были получены высокооднородные стержни из легированного материала. Для исследования оптических, люминесцентных и генерационных свойств из стержней после нанесения (путем жакетирования) нелегированной кварцевой оболочки вытягивались волоконные световоды в полимерном покрытии. Минимальный уровень серых оптических потерь в световодах, солегированных  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  составил около 75 дБ/км на длине волны 1100 нм.

Разработанная методика позволила также перейти от легирования алюминием к совместному легированию алюминием и фосфором, что позволяет понизить показатель преломления материала до уровня кварцевого стекла. В презентации будут приведены результаты тестирования таких образцов.

1. В.В. Вельмискин, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, Третья всероссийская конференция по волоконной оптике, Пермь. **В7-3** (2011).
2. V.V. Velmiskin et al., Proc. SPIE. **8426**, 84260I-1-8 (2012).

# МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ ТУЛИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОЛЬМИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЗАТВОРА

Я.Э. Садовникова<sup>1</sup>, В.А. Камынин<sup>1</sup>, А.С. Курков<sup>1</sup>, О.И. Медведков<sup>2</sup>,  
А.В. Маракулин<sup>3</sup>, Л. А. Минашина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>2</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>3</sup>Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ, Челябинская обл.,  
Снежинск

E-mail: [yanasadovnikova@gmail.com](mailto:yanasadovnikova@gmail.com)

Предложена и реализована новая схема тулиевого волоконного лазера с пассивной модуляцией добротности. В качестве активной среды лазера использовалось волокно, легированное ионами тулия с концентрацией около  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , длина волокна в резонаторе составила 2 м. Особенностью схемы является использование в качестве затвора отрезка волокна, легированного ионами гольмия с высокой концентрацией. Следует отметить, что в работе [1] волокно, легированное ионами гольмия, использовалось в качестве затвора для иттербиевого импульсного лазера. Получена генерация на длине волны 1.96 мкм с энергией импульсов 3 мкДж. Длительность импульсов составила 600 нс, максимальная частота следования – 80 кГц.

Для выбранной длины поглотителя 5 см порог генерации составил 700 мВт. Спектр генерации представлен на рис.1. На рис.2 представлена характерная последовательность импульсов на выходе лазера. Частота генерации линейно возрастала с увеличением мощности накачки, достигая 80 кГц при максимальной мощности накачки 2.1 Вт.

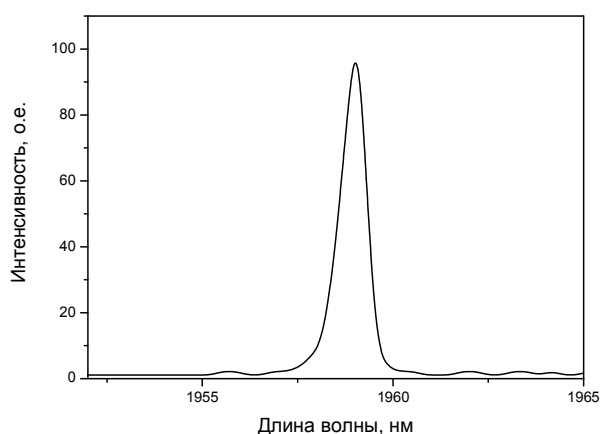


Рис. 1 Спектр генерации лазера

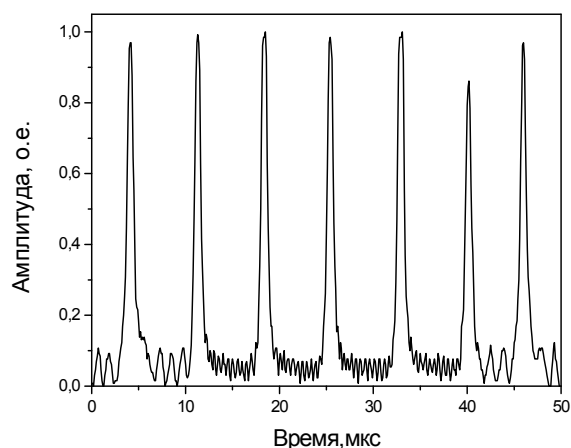


Рис. 2 Последовательность импульсов

Предложенная схема не уступает популярным способам получения режима модуляции добротности.

- 1 A.S. Kurkov, M. Sholokhov, O.I. Medvedkov, Laser Phys. Letters. **6**, 135 (2009).



# **НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

## ЗАГАДОЧНЫЙ МЕТАБОРАТ МЕДИ

М.Н. Попова

*Институт спектроскопии РАН, Троицк (Москва)*

*E-mail: [popova@isan.troitsk.ru](mailto:popova@isan.troitsk.ru)*

Сложные металлооксидные соединения демонстрируют большое разнообразие физических свойств и явлений, иногда экзотических (спин-пайерлсовский переход в  $\text{CuGeO}_3$ , холдейновская щель в  $\text{Y}_2\text{BaNiO}_5$ , высокотемпературная сверхпроводимость в купратах). Они активно изучаются как любителями «чистой» науки, главный интерес которых – понять суть явления, так и людьми более практичными, думающими о создании новых технологий и приборов. В замечательном семействе упомянутых оксидов достойное место занимает метаборат меди  $\text{CuB}_2\text{O}_4$ . Красивые прозрачные кристаллы  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  насыщенного синего цвета были недавно обнаружены в форме природного минерала, его назвали сантаросаит, по имени места в Чили, где его нашли (Santa Rosa). Хотя синтез этого соединения с простой формулой был описан еще Д.И. Менделеевым в книге «Основы химии» (С-Петербург, 1909), расшифровать структуру удалось только в 1971 г., а первые работы по исследованию свойств появились уже в XXI веке. Число публикаций в ведущих физических и материаловедческих журналах возрастает с каждым годом, причем результаты и/или выводы разных работ зачастую противоречивы и вызывают острые дискуссии.

Несмотря на свою простую химическую формулу, метаборат меди – соединение со сложной кристаллической структурой (элементарная ячейка содержит 12 формульных единиц). В структуре имеются две различные позиции ( $4b$  и  $8d$  с симметрией  $S_4$  и  $C_2$ ) для магнитного иона  $\text{Cu}^{2+}$  ( $S = 1/2$ ). В обеих позициях медь квадратно координирована, как и в высокотемпературных сверхпроводниках. Две магнитные подсистемы меди,  $4b$  и  $8d$ , упорядочиваются отдельно (что само по себе уникально), при температурах  $T_N = 21$  К ( $4b$ ) и  $T^* = 8.5$  К ( $8d$ ). Конкуренция различных внутри- и межподсистемных обменных взаимодействий и геометрическая фрустрация обменов приводят к сложной фазовой диаграмме  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  с различными магнитными структурами и многочисленными спонтанными и индуцированными полем фазовыми переходами, природа которых далека от понимания. В чистом метаборате меди не удалось наблюдать магнитоэлектрические эффекты. Частичное замещение меди никелем (~ 3 %) приводит к значительному росту намагниченности и появлению электрической поляризации под действием магнитного поля. Таким образом,  $(\text{Cu,Ni})\text{B}_2\text{O}_4$  – мультиферроик. Была продемонстрирована возможность управлять его намагниченностью с помощью электрического поля [1] и поляризацией с помощью магнитного поля [2].

Оптические свойства кристаллов  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  необычны. Это единственное соединение меди, в спектре которого присутствуют узкие бесфононные линии (БФЛ) для всех  $d-d$  переходов (в обеих позициях меди,

*4b* и *8d*) [3]. БФЛ сопровождаются богатой вибронной структурой [3], ее удалось частично идентифицировать благодаря исследованию фононного спектра [4]. В метаборате меди наблюдали инициированную магнитным полем генерацию второй гармоники [5]. Недавно сообщалось о гигантском оптическом магнитоэлектрическом эффекте [6] и наблюдении *кругового дихроизма* в  $\text{CuV}_2\text{O}_4$ , меняющего знак при повороте магнитного поля [7,8], однако эти данные были позже оспорены на основании симметричного анализа [9]. Последовавшая затем дискуссия [10,11] так и не прояснила полностью вопрос.

В нашей лаборатории начаты спектроскопические исследования метабората меди с целями (1) получить информацию о магнитных межподсистемных взаимодействиях в  $\text{CuV}_2\text{O}_4$ , используя БФЛ *d-d* оптических переходов в качестве внутреннего спектроскопического зонда, и (2) прояснить вопрос об оптическом дихроизме. В температурных зависимостях ширин и частот БФЛ, относящихся к ионам  $\text{Cu}^{2+}$  в позиции *4b* (*8d*), наблюдаются четкие особенности при  $T_N$  ( $T^*$ ). На изменения в «чужой» подсистеме БФЛ тоже реагируют, хотя и гораздо слабее. Обнаружен *линейный дихроизм* в базовой плоскости *ab* тетрагонального кристалла  $\text{CuV}_2\text{O}_4$  ниже  $T_N$ , для БФЛ  $\text{Cu}(4b)$ . Установлено, что при этом линии имеют дублетную структуру, связанную с магнитным давидовским расщеплением. Компоненты дублетов по-разному поляризованы и меняют интенсивность при повороте поляризатора, причем максимумы совпадают с направлениями [110] и [-110] магнитных доменов в подсистеме  $\text{Cu}(4b)$ . Исследование температурной и полевой зависимостей дихроизма позволило зарегистрировать расщепление фазового перехода при  $T^*$  на два перехода и получить некоторые сведения о характере магнитных структур в разных областях *H-T* фазовой диаграммы. Наши результаты ставят точку в споре авторов работ [7,8,10], с одной стороны, и [9,11] – с другой. Однако исследования метабората меди продолжаются, обещая еще много интересных открытий.

1. M. Saito, K. Ishikawa, S. Konno, K. Taniguchi, T. Arima, Nature Materials. **8**, 634 (2009).
2. N. D. Khanh, N. Abe, K. Kubo, T. Arima et al., Phys. Rev. **87**, 184416 (2013).
3. R. Pisarev, A. Kalashnikova, O. Schöps et al., Phys. Rev. **84**, 075160 (2011).
4. R. Pisarev, K. Boldyrev, M. Popova, et al., Phys. Rev. **88**, 024301 (2013).
5. R. Pisarev, I. Štanger, G. Petrakovskii et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 037204 (2004).
6. M. Saito, K. Taniguchi, T. Arima, J. Phys. Soc. Japan. **77**, 013705 (2008).
7. M. Saito, K. Ishikawa, K. Taniguchi et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 117402 (2008).
8. T. Arima, J. Phys.: Condens. Matter. **20**, 434211 (2008).
9. S. W. Lovesey, U. Staub, J. Phys.: Condens. Matter. **21**, 142201 (2009).
10. T. Arima, M. Saito, J. Phys.: Condens. Matter. **21**, 498001 (2009).
11. S. W. Lovesey, U. Staub, J. Phys.: Condens. Matter. **21**, 498002 (2009).

СТРУКТУРА И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ ЧАСТИЧНО  
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ИТТРИЕМ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ,  
АКТИВИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ

П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, М.А. Борик<sup>2</sup>, Т.В. Волкова<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>,  
Ф.О. Милович<sup>3</sup>, В.А. Мызина<sup>2</sup>, Н.В. Сидорова<sup>1</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</sup>,  
С.Н. Ушаков<sup>2</sup>, А.Н. Чабушкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСИС», Москва

E-mail: [ryabochkina@freemail.mrsu.ru](mailto:ryabochkina@freemail.mrsu.ru)

Кристаллы твердых растворов  $(1-x)\text{ZrO}_2-x\text{R}_2\text{O}_3$ , где (R – Ln, Y, Sc, Mg, Ca) привлекают значительный интерес исследователей [1-10], так как благодаря их уникальным физико-химическим свойствам, они находят широкие практические применения.

В процессе охлаждения после кристаллизации  $\text{ZrO}_2$  испытывает ряд полиморфных превращений. В интервале температур от 2680-2370 С для  $\text{ZrO}_2$  является устойчивой кубическая модификация. В температурном интервале от 2370 до 1160 С для диоксида циркония устойчива тетрагональная модификация, а при температурах ниже 1160 С для него является устойчивой моноклинная модификация.

При образовании твердых растворов диоксида циркония с оксидами элементов второй и третьей групп Периодической системы ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) значительным образом понижаются температуры обоих фазовых переходов, вследствие чего обеспечивается стабилизация высокотемпературных кубической и тетрагональных модификаций  $\text{ZrO}_2$  соответствующими оксидами. Фазовый состав материала на основе диоксида циркония определяется видом и количеством стабилизирующего оксида в твердом растворе  $(1-x)\text{ZrO}_2-x\text{R}_2\text{O}_3$  [1].

Особую нишу среди материалов на основе диоксида циркония занимают кристаллы частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ). Для этих материалов характерно наличие микро - и наноразмерной доменной структуры, которая в значительной степени определяет их уникальные механические свойства (высокие значения прочности, вязкости разрушения, износостойкость).

Для практических применений представляют интерес материалы ЧСЦ как в виде керамики, так и в виде монокристаллов. Для монокристаллов ЧСЦ характерны свои особенности физических свойств. При проведении исследований структуры и свойств монокристаллов ЧСЦ, исключается влияние границ зерен, присутствующих в керамических материалах.

В процессе высокотемпературного синтеза монокристаллов ЧСЦ из расплава при охлаждении происходит трансформация кубической фазы в

тетрагональную фазу, сопровождающаяся формированием сложной двойниковой доменной структуры. При этом в образцах кристаллов ЧСЦ, содержащих от 2.8 до 5.0 мол.%  $Y_2O_3$ , присутствуют две тетрагональные фазы с различной степенью тетрагональности, принадлежащие к пространственной группе симметрии  $R4_2/mnc$  [9,10].

Исследование в кристаллах ЧСЦ соотношения количества двух тетрагональных фаз, одна из которых является трансформируемой, является важным с практической точки зрения, так как от их количественного соотношения зависят механические свойства данных материалов, которые определяют их использование в различных областях техники.

В настоящей лекции представлен обзор результатов исследований, направленных на изучение формирования доменной структуры в монокристаллах ЧСЦ с различной концентрацией стабилизирующего оксида  $Y_2O_3$ , полученных авторами [9,10].

Также в лекции представлены результаты собственных исследований структуры, фазового состава, спектрально-люминесцентных свойств для концентрационной серии наноструктурированных кристаллов ЧСЦ составов  $ZrO_2-(2.0, 2.8, 3.7)$  мол.%  $Y_2O_3$ , легированных ионами  $Nd^{3+}$ ,  $ZrO_2-(2.03, 2.5)$  мол.%  $Y_2O_3$ , легированных ионами  $Nd$  и  $Ce$ , кристаллов  $ZrO_2(2.5, 3.4)$  мол.%  $Y_2O_3$ , легированных ионами  $Er^{3+}$ . На основе анализа и сопоставления данных результатов исследования, выявлена связь между особенностями структуры и спектрально-люминесцентными характеристиками ионов  $Nd^{3+}$  и  $Er^{3+}$  для соответствующих концентрационных рядов кристаллов.

Результаты исследований, представленные в лекции, получены при финансовой поддержке гранта РФФИ офи\_м, № проекта 13-02-051.

1. Ю.С. Кузьминов, В.В. Осико, *Фианиты*, М.: Наука, 2001.
2. В.И. Александров, В.В. Осико, А.М. Прохоров и др., Известия АН СССР: Неорган. Материалы. **8**, 956 (1972).
3. V.V. Osiko, Wenckus J.f. in book of Lecture Notes. First Int. School on Crystal Growth Technology, Beatenberg, Switzerland. 580 (1998).
4. D. Baither, B. Baufeld, U. Messerschmidt et al., J. Am.Ceram.Soc. **80**, 1691 (1997).
5. V. V. Alisin, M.A. Borik, E.E. Lomonova et al., Mater. Sci. Eng. **25**, 577 (2005).
6. М.А. Борик, В.Т. Бублик, А.В. Кулебякин и др., Физика твердого тела. **55**, 1578 (2013).
7. R.H.J. Hannink, P.V. Kelly, B.C. Muddle, J. Am.Ceram.Soc. **83**, 461 (2000).
8. А.Н. Heuer, J. Am.Ceram.Soc. **70**, 689 (1987).
9. М.А. Борик, В.Т. Бублик, А.В. Кулебякин et. al, Journal of Alloys and Compounds. **586**, 231 (2014).
10. Ф.О. Милович, Автореферат дис. на соиск. уч. ст. канд.физ.-мат. наук. Москва (2013).

КОМПЛЕКСНЫЙ ПРОЕКТ «ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ  
НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ БАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
СТРУКТУР «КРЕМНИЙ НА МОЛИБДЕНЕ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ»:  
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НИОКТР

В.В. Елисеев<sup>1</sup>, В.А. Мартыненко<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>2</sup>, М.И. Новопольцев<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ОАО «Электровыпрямитель», Саранск

<sup>2</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
E-mail: [nishchev@inbox.ru](mailto:nishchev@inbox.ru)

Сообщается о результатах реализации первых трех отчетных периодов комплексного проекта «Организация производства полупроводниковых приборов силовой электроники нового поколения на основе создания базовой технологии изготовления структур «кремний на молибдене» с использованием низкотемпературных соединений», выполняемого в рамках Постановления Правительства РФ №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Целью проекта является разработка новой технологии изготовления структур «кремний на молибдене» (КНМ), основанной на применении серебрясодержащих паст (СП) для низкотемпературного соединения элементов структур силовых полупроводниковых приборов. На базе данной технологии на ОАО «Электровыпрямитель» планируется создать высокотехнологичное промышленное производство полупроводниковых приборов силовой электроники с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Основной задачей завершившихся отчетных периодов комплексного проекта являлась разработка предварительного проекта технологического процесса изготовления структур КНМ (ТП КНМ). В ходе выполнения проекта исполнителями проведены патентные исследования, разработана предварительная технологическая документация, разработаны программы и методики исследовательских испытаний (ПИ), проведены исследовательские испытания макетов структур КНМ и ТП КНМ.

В докладе представлены результаты исследовательских испытаний макетов структур КНМ в части определения:

- геометрических параметров, элементного состава и адгезионной прочности металлических слоев, нанесенных на соединяемые поверхности кремния и молибдена;
- влияния технологических режимов напыления металлических слоев на их механическую прочность и адгезию к кремнию и молибдену.
- микроструктуры, элементного состава, пористости, теплопроводности, КТР и электропроводности спеченных слоев серебрясодержащих паст (СП);

- адгезии спеченных слоев СП к кремнию и молибдену;
- влияния технологических параметров спекания на электрические, теплофизические и термомеханические характеристики спеченных слоев СП;
- структуры и элементного состава границ раздела и адгезии между спеченным слоем СП и прилегающими металлическими слоями.

1. К.Н. Нищев, В.А. Мартыненко, В.И. Беглов и др., Известия вузов. Поволжский регион. Физ.-мат. науки. **3 (27)**, 237 (2013).
2. К.Н. Нищев, М.И. Новопольцев, В.П. Мишкин, Тезисы XXV Российской конференции по электронной микроскопии, РКЭМ. **2**, 468-469 (2014).
3. Д.С. Горбунов, К.Н. Нищев, В.П. Мишкин, [Электронный ресурс] Огарев-online. «Физико-математические науки». **19** (2014). URL:<http://journal.mrsu.ru/arts/issledovanie-struktury-nogoslojjnykh-metallicheskich-pokrytij-na-kremnii-metodami-rehm-i-szm>.

Работа выполнена в рамках договора №02.G25.31.0051 между ОАО «Электровыпрямитель» и Министерством образования и науки Российской Федерации об условиях предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения.

# ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

В.В. Андреев

*Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары  
E-mail: [andreev\\_vsevolod@mail.ru](mailto:andreev_vsevolod@mail.ru)*

Диэлектрический барьерный разряд является одним из эффективных способов генерации неравновесной низкотемпературной плазмы при высоких, средних и низких давлениях для разнообразных технологических применений. Так, технологии, основанные на применении приповерхностной низкотемпературной плазмы, генерируемой в разрядных ячейках диэлектрического барьерного разряда, находят широкое и разнообразное применение в настоящее время. Плазменные и плазмохимические технологии востребованы, например, при разработке:

- методов плазменного (так называемого «сухого») травления;
- технологий формирования поверхностных слоев с заданными свойствами;
- методов направленного изменения физико-химических свойств поверхностных слоев материалов;
- технологий получения высокоэффективных гетерогенных катализаторов;
- технологий получения высокопористых материалов с равномерным распределением пор за счёт их объёмной обработки плазмой.

Кроме того, приповерхностная плазма вызывает значительный интерес в создании технологий управления высокоскоростными потоками воздуха, обтекающими движущиеся в воздухе объекты, путём воздействия на характеристики пограничного слоя с помощью электрических разрядов.

Плазмохимические реакторы на основе диэлектрического барьерного разряда применяются также для синтеза новых веществ. Так, они широко используются в качестве промышленных источников озона. Следует отметить, что озон является мощным окислителем, а также обладает высокой способностью уничтожать бактерии, споры и одноклеточные организмы. Небольшие дозы озона оказывают профилактическое и терапевтическое воздействие (известно, что предельно допустимая концентрация (ПДК) озона в воздухе рабочей зоны составляет 0.1 мг/м<sup>3</sup>).

В работе также рассмотрены экспериментальные установки генераторов плазмы на основе диэлектрического барьерного разряда.

Нами, в частности, был разработан и детально исследован генератор плазмы на основе диэлектрического барьерного разряда, в котором один из электродов является вращающимся. При достаточной простоте конструкции электроразрядной установки и доступности её практической реализации, в ней сравнительно легко обеспечить разнообразие форм и условий организации газового разряда.



## СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ТРИ-(8-ОКСИХИНОЛЯТА)-БОРА

А.А. Аккузина, Р.И. Аветисов, И.Х. Аветисов

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Москва

E-mail: [aich@rctu.ru](mailto:aich@rctu.ru)

Особое внимание при создании OLED-структур уделяется фазовому составу и чистоте материалов, поскольку именно они определяют функциональные характеристики (эффективность и долговечность) устройств. Значительное место среди органических электролюминофоров занимают металлокомплексные соединения на основе 8-оксхинолина (q). В ряду  $\text{Inq}_3 \rightarrow \text{Ga q}_3 \rightarrow \text{Alq}_3$  эффективность электролюминесценции возрастает при смещении спектрального максимума в коротковолновую область. В этой связи интерес представляет крайний член ряда –  $\text{Vq}_3$ . Однако данные о его получении и люминесцентных свойствах в литературе практически отсутствуют. В [1] предполагают, что данное соединение является неустойчивым, так как характер связей для кислорода и азота полностью отличается от  $\text{Alq}_3$ .

В настоящей работе был разработан способ получения порошкового препарата  $\text{Vq}_3$  с чистотой по неорганическим примесям >99,995 мас.%. и выполнено исследование его спектральных характеристик. Было установлено, что растворные методы синтеза не позволяют получить  $\text{Vq}_3$ , поэтому синтез проводили по гетерофазной реакции (1) при 120°C в течение 2 часов в стеклоуглеродном тигле.

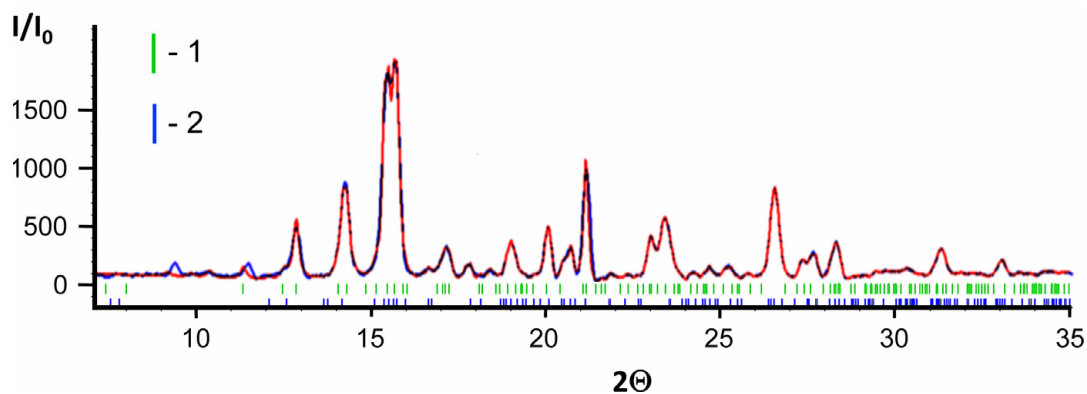


Рис.1. Порошковая дифрактограмма с уточнением фаз  $\alpha$ -  $\text{Vq}_3$  (1),  $\delta$ -  $\text{Vq}_3$  (2) методом Ритвельда: эксперимент (голубая) и расчет (красная).

По данным РФА (рис.1) нами была получена смесь двух полиморфных модификаций. Спектр фотолюминесценции характеризовался наличием одного максимума, который смещался от 485 до 456 нм при изменении соотношения фаз  $\alpha$ : $\delta$  от 1:1 до 1:4.  $\text{Vq}_3$ .

- 1 Wong, Kin-Yiu, Technical report. Topics in Applied Quantum Mechanics – Molecular Modeling The Chinese Univ. of Hong Kong, 2001.

## ДИНАМИКА РЕШЕТКИ И ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В МУЛЬТИФЕРРОИКЕ $\text{PrFe}_3(\text{VO}_3)_4$

К.Н. Болдырев<sup>1</sup>, М.Н. Попова<sup>1</sup>, Т.Н. Станиславчук<sup>2</sup>, С.А. Климин<sup>1</sup>,  
В.А. Чернышев<sup>3</sup>, А.Е. Никифоров<sup>3</sup>, В.П. Петров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт спектроскопии Российской академии наук, Москва*

<sup>2</sup>*Department of Physics, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, USA*

<sup>3</sup>*Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

*E-mail: [kn.boldyrev@gmail.com](mailto:kn.boldyrev@gmail.com)*

Кристаллы с общей формулой  $R\text{Fe}_3(\text{VO}_3)_4$  (где  $R$  – редкоземельный элемент), изоструктурные природному минералу хантиту, в течение последнего десятилетия привлекают пристальное внимание в связи с их уникальными магнитными, оптическими, диэлектрическими свойствами. Многие свойства подобных систем определяются их кристаллической решеткой.

В настоящей работе проведено комплексное исследование динамики решетки мультиферроика  $\text{PrFe}_3(\text{VO}_3)_4$ . Зарегистрированные спектры отражения, комбинационного рассеяния света и эллипсометрии кристалла празеодимового ферробората при комнатной температуре позволили идентифицировать КРС- и ИК-активные [1] колебательные моды. Дальнейшее моделирование спектров методом дисперсионного анализа позволило определить параметры колебательных мод, их частоты и силы осцилляторов. Проведены *ab initio* расчеты фононных мод центра зоны Бриллюэна с использованием теории функционала плотности (DFT).

Кроме того, по температурным зависимостям спектров отражения и эллипсометрии в длинноволновой области спектра ( $20\text{--}90\text{ см}^{-1}$ ) обнаружено сильное взаимодействие электронной подсистемы иона празеодима и колебания кристаллической решетки в  $\text{PrFe}_3(\text{VO}_3)_4$  [2]. С понижением температуры происходит взаимное «расталкивание» энергий квази-электронного (переход  $\Gamma_2 \rightarrow \Gamma_1$  в ионе  $\text{Pr}^{3+}$ ) и квази-фононного (фонон симметрии  $A_2$ , связанный с колебанием иона  $\text{Pr}^{3+}$ ) возбуждений. Моделирование позволило установить константу электрон-фононного взаимодействия ( $14.8\text{ см}^{-1}$ ). Впервые удалось наблюдать инверсию ТО-ЛО расщепления для электронного осциллятора, частота которого попадает в ТО-ЛО интервал фонона [2].

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК–1700.2013.2).

1. К. Н. Болдырев, Д.А. Ерофеев, *Оптика и спектроскопия* **116**, 67 (2014).
2. K. N. Boldyrev, T. N. Stanislavchuk, A. A. Sirenko, L. N. Bezmaternykh, M. N. Popova, arXiv:**1402.0434** [cond-mat.mtrl-sci] (2014).

## РАСТВОРИМОСТЬ СЕЛЕНА В НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОМ СЕЛЕНИДЕ ЦИНКА

Чан Кхань, Е.Н. Можевитина, А.В. Хомяков, И.Х. Аветисов  
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Москва  
E-mail: [aich@rctu.ru](mailto:aich@rctu.ru)

Селенид цинка принадлежит к числу наиболее перспективных широкозонных материалов типа  $A^{II}B^{VI}$  для светодиодной техники, детекторов рентгеновского излучения и прозрачных окон для лазеров в ИК и видимой областях спектра. Несмотря на многочисленные исследования селенида цинка, до настоящего времени согласованные данные о механизме образования дефектов в кристаллах селенида цинка отсутствуют.

В настоящей работе мы исследовали нестехиометрию селенида цинка в условиях бивариантного равновесия  $S_{ZnSe}V$ . Зависимость растворимости сверхстехиометрического селена от парциального давления  $\lg X_{Se} = f(P_{Se_2})$  исследовали, синтезируя препараты  $ZnSe$  в условиях бивариантного равновесия  $S_{ZnSe}V$  при температуре 1078 К. После синтеза препараты закаливали и определяли в них концентрацию сверхстехиометрического селена методом извлечения [1], измеряли спектры люминесценции и диффузного отражения порошковых препаратов.

Установлено, что в интервале парциальных давлений  $P_{Se_2}$  11,5÷56,8 кПа концентрация сверхстехиометрического селена пропорционально давлению пара молекул  $Se_2$  в степени 1 (рис.1). Высказано предположение о том, что в данных условиях при растворении Se в нестехиометрическом  $ZnSe$  доминирующими дефектами являются электронейтральные дивакансии в подрешетке цинка  $(V_{Zn})_2^{\times}$ .

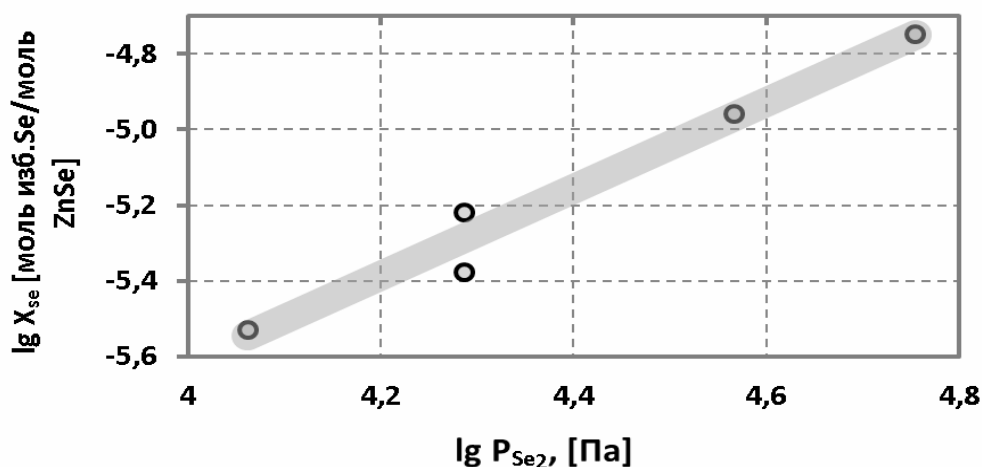


Рис. 1. Изотермическая зависимость концентрации избыточного селена в нестехиометрическом  $ZnSe$  от давления пара селена при 1078 К.

1. И. Х. Аветисов Известия ВУЗов. МЭТ, 3, 68 (2008).

# ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В СПЕКТРАХ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{LaAlO}_3:\text{Ho}$ , $\text{Tm}$ , $\text{Pr}$

Е.А. Добрецова<sup>1</sup>, К.Н. Болдырев<sup>1</sup>, П. Дерен<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт спектроскопии Российской академии наук, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of  
Sciences, Wroclaw, Poland*

*E-mail: [elena-dobrecova@yandex.ru](mailto:elena-dobrecova@yandex.ru)*

Кристаллы  $ABX_3$  со структурным типом перовскита перспективны для различных применений в науке и технике. Такие соединения могут быть сегнетоэлектриками, мультиферроиками, высокотемпературными сверхпроводниками, лазерными кристаллами и т.п., что определяется различными комбинациями атомов. Кристаллы алюмината лантана  $\text{LaAlO}_3$  имеют псевдокубическую структуру и потенциально применимы в качестве лазерных сред.

Нами были получены спектры кристаллов лантанового алюмината, легированного гольмием, тулием и празеодимом, в широкой области температур (3-300К) при высоким спектральным разрешением ( $0,02 \text{ см}^{-1}$ ) и в спектральном диапазоне  $2000\text{-}20000 \text{ см}^{-1}$ . Кроме того, были проведены исследования в слабых магнитных полях (до 1 Т). Редкоземельные ионы  $\text{Ho}$ ,  $\text{Tm}$ ,  $\text{Pr}$  в кристаллах  $\text{LaAlO}_3$  замещают  $\text{La}^{3+}$ , находящийся в позиции с точечной группой симметрии  $D_3$ . В кристаллическом поле такой симметрии существуют следующие уровни некрамерсовских ионов: синглеты  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  и дублеты  $\Gamma_3$ . С учетом правил отбора в исследуемых соединениях была построена схема штарковских уровней редкоземельных ионов, а также определены их неприводимые представления. Исследования в магнитном поле позволили экспериментально установить g-факторы некоторых дублетов. Кроме того, в спектрах редкоземельных ионов было обнаружено расщепление нескольких спектральных линий, соответствующих переходам  $\Gamma_1, \Gamma_2 \rightarrow \Gamma_3$ . Это расщепление объясняется нами как совместный эффект магнитного сверхтонкого взаимодействия и случайных деформаций кристаллической решетки [1].

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых кандидатов (МК – 1700.2013.2).

1. S. Klimin, D. Pytalev, M. Popova, V. Malkin et.al., Phys. Rev. B **81**, 045113 (2010).

# СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ФЕРРОБОРАТЕ ГОЛЬМИЯ

Д.А. Ерофеев<sup>1,2</sup>, Е.П. Чукалина<sup>1</sup>, М.Н. Попова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт спектроскопии Российской академии наук, Троицк (Москва)

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный

E-mail: [kinson@mail.ru](mailto:kinson@mail.ru)

Ферроборат гольмия относится к семейству мультиферроиков с общей формулой  $RFe_3(BO_3)_4$ , где  $R = Y, La - Lu$ . Это соединение кристаллизуется в тригональной сингонии: пространственная группа симметрии  $R32$ . При  $T_s = 420K$  происходит структурный фазовый переход с понижением симметрии до  $R3_121$  [1]. Эксперименты по рассеянию нейтронов [2] позволили зафиксировать появление брэгговских пиков при температурах ниже 38K, а затем резкий скачек их интенсивностей при 5K. Эти особенности соответствуют магнитному фазовому переходу ( $T_N = 38,5K$ ) и спин-переориентационному фазовому переходу ( $T_R = 5K$ ). По проведенным ранее спектроскопическим исследованиям монокристалла  $HoFe_3(BO_3)_4$  был зарегистрирован магнитный фазовый переход в легкоплоскостную структуру (магнитные моменты железа  $M_{Fe}$  находятся в плоскости  $ab$ ) [3]. При  $T < T_R$   $M_{Fe}$  переориентируются вдоль кристаллографической оси  $c$  (легкоосная структура) [2].

Цель настоящего исследования – изучение особенностей фазовых переходов в  $HoFe_3(BO_3)_4$  по температурным зависимостям спектральных линий иона  $Ho^{3+}$ . Прозрачный зеленый монокристалл хорошего оптического качества был выращен раствор-расплавным методом в Институте Физики им. Л.В.Киренского, г.Красноярск. Спектры пропускания  $HoFe_3(BO_3)_4$  в  $\alpha$ -поляризации были зарегистрированы на фурье-спектрометре высокого разрешения Bruker IFS 125HR в спектральной области  $4000-23000\text{см}^{-1}$  и в диапазоне температур 3-300K при помощи криостата замкнутого цикла Cryomech ST403. По температурным зависимостям спектральных линий установлено, что при температурах  $T_R$  и  $T_N$  происходит скачкообразное изменение спектральных характеристик линий. Это свидетельствует о том, что эти фазовые переходы – первого рода. Точка перегиба на температурной зависимости положения спектральной линии соответствует магнитному фазовому переходу  $T_N = 39K$ . Полученные данные хорошо согласуются с данными проведенных ранее экспериментальных исследований.

1. Yukio Hinatsu, Yoshihiro Doi, Kentaro Ito et al., J. Solid State Chem. **172**, pp. 438-445 (2003).
2. C. Ritter, A. Vorotynov, A. Pankrats et al., J. Phys.: Condens. Matter **20**, 365209 (9pp) (2008).
3. T.N. Stanislavchuk, E.P. Chukalina, M.N. Popova et al., Physics Letters A **368**, pp. 408-411 (2007).

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ЧСЦ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.В. Алисин<sup>1</sup>, М.А. Борик<sup>2</sup>, В.Т. Бублик<sup>3</sup>, А.В. Кулебякин<sup>2</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>,  
Ф.О. Милович<sup>3</sup>, В.А. Мызина<sup>2</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</sup>, О.Н. Чурляева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>3</sup>*Московский институт стали и сплавов, Москва*

*E-mail: [kulebyakin@lst.gpi.ru](mailto:kulebyakin@lst.gpi.ru)*

Кристаллы частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ) являются перспективным конструкционным материалом для использования в узлах трения, так как они обладают высокими прочностными характеристиками в сочетании с низким коэффициентом трения. Трибологические свойства любого материала определяются сочетанием твердости и пластичности его поверхностных слоев, обеспечивающих максимальную износостойкость. Практически единственным методом оценки механических свойств поверхностных слоев является метод определения кинетической микротвердости, основанный на непрерывной регистрации параметров процесса вдавливания индентора, а именно нагрузки на индентор и глубины его погружения. Метод позволяет выявлять кинетические и структурные закономерности деформации образцов.

С использованием этого метода, а также методами традиционного индентирования были изучены механические свойства наноструктурированных кристаллов ЧСЦ разного химического состава. Микроиндентирование проводилось по методике International Standard “Metallic Materials – Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters” ISO/DIS 14577. Кристаллы  $ZrO_2$  стабилизированные  $Y_2O_3$  были выращены методом направленной кристаллизации расплава в холодном контейнере с использованием высокочастотного нагрева.

Установлено, что введение дополнительных примесей (Ce, Co, Nd) существенным образом влияет на коэффициент пластичности и трещиностойкость кристаллов. Предложен новый критерий отбора материала для узлов трения, а именно произведение твердости поверхности на коэффициент пластичности. Выполненные исследования дают основание сделать вывод о том, что практический интерес для применения ЧСЦ в узлах трения представляют кристаллы легированные Co, Ce с содержанием стабилизирующей примеси 2.8 мол.%  $Y_2O_3$ .

# ВЛИЯНИЕ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР С НАНОКОМПОЗИТНЫМИ ДЕФЕКТАМИ ЭФФЕКТОВ СВЯЗАННЫХ С РАЗМЕРАМИ ЧАСТИЦ

В.А. Остаточников, С.Г. Моисеев, Д.И. Семенцов  
 Ульяновский государственный университет, Ульяновск  
 E-mail: [ost.vld@yandex.ru](mailto:ost.vld@yandex.ru)

В работе рассматривается слоисто-периодическая структура (СПС), в которой в качестве слоя нарушающего периодичность структуры рассматривается наноккомпозит (стеклянная матрица с распределенными наноразмерными серебряными частицами). Нарушения периодичности одномерных СПС (дефекты) приводят к появлению в фотонных запрещенных зонах узких областей пропускания, что дает возможность использовать СПС с дефектами для модуляции и фильтрации электромагнитного излучения [1]. Оптические свойства наноккомпозита зависят от размера наночастиц, что влияет на спектральные зависимости отражения, прохождения и поглощения электромагнитного излучения в СПС. На рис.1 показано изменение спектров отражения (а) и поглощения (б) ФКС  $M^6 m_d \hat{M}^6$ , с дефектом толщиной  $d_3 \cong 284$  нм без наночастиц  $\varepsilon_d = \varepsilon_m = 2.25$  (пунктир) и с наноккомпозитным дефектом при  $\eta = 0.2$  и  $s = 20$  нм, 50 нм (сплошная, штрих, соответственно).

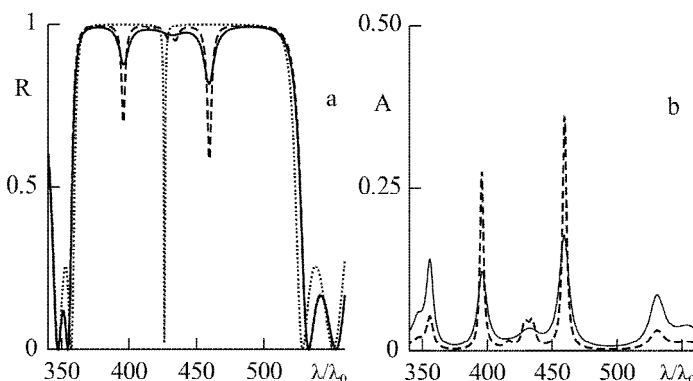


Рис.1. Спектры отражения (а) и поглощения (б) ФКС  $M^6 m_d \hat{M}^6$ , с дефектом толщиной  $d_3 \cong 284$  нм без наночастиц  $\varepsilon_d = \varepsilon_m = 2.25$  (пунктир) и с наноккомпозитным дефектом при  $\eta = 0.2$  и  $s = 20$  нм, 50 нм (сплошная, штрих соответственно).

Для нерезонансной структуры, которую мы считаем не поглощающей, коэффициент отражения  $R = 1 - T$ . В этом случае коэффициент пропускания для дефектной моды не достигает максимально возможного значения. Для резонансной структуры наблюдается расщепленной дефектной моды, а увеличение размеров наночастиц приводит к снижению отражения. Все прошедшее в структуру излучение поглощается наноккомпозитом.

Работа поддержана министерством образования и науки РФ.

1. С.Г. Моисеев, В.А. Остаточников, Д.И. Семенцов. Квант. электроника, т. 42, №6, с. 557–560 (2012).

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО  
И ЛЕГИРУЮЩИХ ОКСИДОВ В КРИСТАЛЛАХ ЧСЦ, ИЗУЧЕННЫЕ  
МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ  
И РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

Л.Д. Исхакова<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>, В.А. Мызина<sup>2</sup>, В.А. Панов<sup>2</sup>,  
А.Т. Саввичев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Научный центр волоконной оптики РАН, Москва*

<sup>2</sup> *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>3</sup> *Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, Москва*

*E-mail: [lomonova@lst.gpi.ru](mailto:lomonova@lst.gpi.ru)*

Монокристаллы тетрагональных твёрдых растворов  $ZrO_2 - Y_2O_3$  с добавками редкоземельных ионов Nd + Ce характеризуются уникальными механическими и трибологическими свойствами: высокой вязкостью разрушения, твёрдостью, износостойкостью наряду с низкими значениями коэффициента трения. Возможность использования этих кристаллов в качестве конструкционных материалов в значительной мере определяется как соотношением легирующих примесей, так и однородностью физических свойств вдоль оси выращенных кристаллов. Последний фактор зависит от однородности распределения стабилизирующего оксида (Y) и легирующих добавок (Nd, Ce). Известно, что при выращивании кристаллов методом направленной кристаллизации из расплава коэффициент распределения Y близок к 1. Цель данной работы состояла в исследовании распределения легирующих примесей неодима и церия.

Рост кристаллов проведен методом направленной кристаллизации из расплава. Концентрации легирующих примесей Nd и Ce изменялись в широких пределах – от 0.06 до 1.0 масс. % в пересчёте на оксид. Оценка концентраций изучаемых элементов проводилась на рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном анализаторе «Респект» с Si(Li)-детектором и рентгенорадиометрическим методом по калибровке эталонами горных пород. Анализ распределения примесей по длине кристалла выполнен методом энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа.

Было установлено, что различие в условиях процесса роста кристаллов обуславливает особенности распределения легирующих примесей. Исследованы кристаллы с послойным распределением примесей, где по длине кристалла чередовались слои обогащённые и обеднённые по содержанию РЗЭ, и кристаллы с равномерным изменением концентрации по длине кристалла. Показано, что в результате оптимизации процессов роста получены кристаллы, содержащие протяжённые (несколько сантиметров длиной) участки с равномерным распределением примесей. Оценены коэффициенты распределения церия и неодима (<1) при различных режимах процесса роста кристаллов, рассмотрены корреляционные соотношения между концентрациями стабилизирующего и легирующих оксидов.



СВИНЦОВО-БАРИЕВЫЕ ФТОРОБОРАТНЫЕ  
СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ  
НЕОДИМОМ И ЭРБИЕМ

О.Б. Петрова, Т.С. Севостьянова, М.О. Анурова, А.В. Хомяков  
*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,*  
*Москва*

E-mail: [petrova@proriv.ru](mailto:petrova@proriv.ru)

Оксифторидные стеклокристаллические материалы (СКМ) являются перспективной матрицей для активирования РЗИ, т.к. совмещают люминесцентные свойства фторидных кристаллов, обладающих низкочастотным фононным спектром, с технологичностью и устойчивостью оксидных стекол. Как в свинцовой, так и в бариевой фтороборатных системах возможно получение устойчивых стекол и СКМ, активированных РЗИ [1–5]. При кристаллизации стекол в системе  $PbF_2-PbO-B_2O_3$  формируются две фторидные кристаллические фазы – орторомбическая  $\alpha-PbF_2$  и кубическая  $\beta-PbF_2$ , при этом в  $\beta-PbF_2$  эффективно входит РЗ-активатор [1–3]; в стеклах системы  $BaF_2-BaO-B_2O_3$  формируется только кубическая кристаллическая фаза –  $BaF_2$ , но вхождение в нее РЗ-активаторов затруднено [4-5].

В данной работе мы синтезировали смешанные свинцово-бариевые стекла, активированные 1 моль.% фторида РЗИ (РЗИ =  $Nd^{3+}$  или  $Er^{3+}$ ), исследовали их свойства и получили на их основе СКМ. Так как при кристаллизации стекол выделяются фазы смешанных фторидов, то мы синтезировали и исследовали кристаллические смешанные фториды свинца-бария, активированные РЗИ.

Исследованы спектры люминесценции  $Nd^{3+}$  в стеклах и СКМ разного состава, отмечено смещение и сужение линий при кристаллизации, а также спектры люминесценции  $Er^{3+}$  при прямом (377 нм) и ап-конверсионном (975 нм) возбуждении, при этом заметно меняется спектр, как в видимой области, так и в ИК-области, особенно при длинноволновом возбуждении. Показано, что РЗИ эффективно входят в образующуюся фазу смешанного фторида свинца-бария.

1. W.A. Pisarski, L. Grobelny, J. Pisarska, et al., *Las. Phys.* **20**, 649 (2010).
  2. D.R. Rao, G.S. Baskaran, R.V. Kumar, et al., *J. Non-Cryst. Sol.* **378**, 265 (2013).
  3. О.Б. Петрова, А.В. Попов, В.Е. Шукшин и др., *Опт. Журн.* **78**, 30 (2011).
  4. K. Biswas, A.D. Sontakke, R. Sen et al., *J. Fluoresc.* **22**, 745 (2012).
- О.Б. Петрова, А.В. Попов, В.Е. Шукшин, *Материалы XV всероссийской конференции, Краснодар*, 72 (2009).

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ

И.В. Степанова, К.Г. Гавриш

*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Москва*

*E-mail: [stir@inbox.ru](mailto:stir@inbox.ru)*

Стекла на основе оксидов висмута и германия, благодаря их прозрачности в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра, можно эффективно легировать переходными и редкоземельными ионами и использовать для получения стеклокристаллических материалов. В ходе наших исследований [1] было отмечено изменение вида спектров поглощения висмутгерманатных стекол под действием термообработки. В данной работе было изучено влияние исходных условий синтеза на стеклообразование, качество и свойства стекол состава  $1\text{Bi}_2\text{O}_3-1\text{GeO}_2$ .

Для синтеза были выбраны следующие условия: температуры 1000, 1025, 1050, 1075 и 1100°C и времена выдержки 0,5 и 1 час. Стекла получали отливом расплава на охлажденную металлическую подложку. Спектры поглощения полученных образцов снимали на спектрофотометре UNICO 2800 (UV/VIS) в диапазоне 190-1100 нм. Диэлектрические характеристики измеряли с помощью мостовой схемы E7-12 с частотой 1 МГц в диапазоне 25-600°C.

Было установлено, что при всех температурах ниже 1050°C образцы получаются полностью или в значительной степени закристаллизованными при всех временах варки. Образцы после отлива имеют насыщенный желто-оранжевый цвет. При  $T = 1050$  и  $1075^\circ\text{C}$  образцы закристаллизованы в меньшей степени, преимущественно на поверхности, цвет изменяется от оранжевого к красному. При  $T=1100^\circ\text{C}$  и получасовой выдержке расплава стекла получают прозрачными, темно-красного цвета, но содержат значительное количество дефектов. Увеличение времени выдержки расплава при  $T=1100^\circ\text{C}$  до 1 часа способствует повышению качества стекол.

Условия синтеза значительно изменяют поглощение стекол в видимом диапазоне. При снижении температуры варки интенсивность плеча поглощения в области 500 нм уменьшается, вплоть до полного исчезновения. Поглощение в этой области связывают с наличием в висмутсодержащих стеклах оптических дефектных  $\text{Vi}$ -центров с общим зарядом  $5+$  [2]. Таким образом, высокая температура стекломассы способствует образованию такого рода центров.

Было отмечено влияние условий синтеза и на диэлектрические характеристики стекол.

1. I.V. Stepanova, N.G. Goraschenko. Optics and Spectroscopy, **114**, 6, 873–875 (2013).
2. Е.М. Дианов. Квантовая электроника, **40**, 4, 283-285 (2010).

# ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СТАБИЛЬНОСТЬ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СУЛЬФИДА ЦИНКА ZnS

А.А. Казанцева<sup>1,2</sup>, Ю.В. Кузнецова<sup>1</sup>, А.А. Ремпель<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт химии твердого тела, УрО РАН, Екатеринбург*

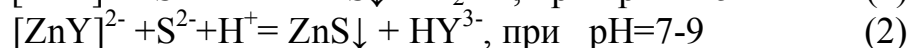
<sup>2</sup> *УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург*

*E-mail: [nastya.kazan@mail.ru](mailto:nastya.kazan@mail.ru)*

Активные разработки по применению нанокристаллических полупроводников на основе сульфидов металлов в биологии, медицине, и особенно в электронике [1], свидетельствуют об актуальности развития новых методов синтеза наночастиц. В связи с этим, данная работа посвящена синтезу наночастиц полупроводникового сульфида цинка ZnS методом химической конденсации [2].

Образование частиц ZnS в растворе происходит за счет взаимодействия исходных компонентов (Na<sub>2</sub>S и ZnSO<sub>4</sub>), взятых в эквимолярных соотношениях. Для ослабления коагуляции наночастиц в растворе в качестве комплексообразующего агента была использована диэтилэтилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА).

Для поиска условий долговременной агрегативной устойчивости водных растворов ZnS была использована возможность скачкообразного изменения pH раствора в ходе синтеза. Исследования показали, что реакция синтеза при различных значениях pH проходит в соответствии со следующими тремя уравнениями:



При pH=5 раствор ZnS с исходной концентрацией компонентов 1мМ не имеет долговременной стабильности. Размер коагулятов наночастиц в растворе за один день увеличивается от начального значения 250±80 до 900±150 нм, а в последующие дни происходит оседание коагулированных наночастиц ZnS.

При понижении величины pH с 5 до 4 происходит осаждение ZnS с последующим его полным растворением в течение нескольких дней.

Более высокие значения pH раствора (>7) позволили получить коллоидный раствор ZnS с размером наночастиц 20±10 нм, остающийся стабильным до нескольких месяцев.

1. L. Hu, M. Chen, W. Shan et al., *Advanced materials*. **24**, 5872 (2012).
2. А.А. Ремпель, Н.С. Кожевникова, С.В. Ремпель, *Известия РАН*. **2**, 400 (2013).

# ШТАРКОВСКАЯ СТРУКТУРА ИОНА $\text{Sm}^{3+}$ В КРИСТАЛЛЕ $\text{SmGa}_3(\text{VO}_3)_4$

С.А. Кокарев<sup>1,2</sup>, С.А. Климин<sup>1</sup>, Н. И. Леонюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН, Троицк (Москва)

<sup>2</sup>Геологический факультет МГУ, Москва

E-mail: [sergeyk92@gmail.com](mailto:sergeyk92@gmail.com)

Семейство редкоземельных (РЗ) боратов  $\text{RM}_3(\text{VO}_3)_4$  ( $\text{M}=\text{Fe}, \text{Al}, \text{Cr}, \text{Ga}$ ) со структурным типом природного минерала хантита образует широкий класс соединений с разнообразными интересными физическими свойствами. В частности, практический интерес представляют нелинейные оптические и магнитоэлектрические (МЭ) свойства данного класса кристаллов. МЭ эффекты основательно изучены для РЗ ферроборатов. В частности, рекордно большая спонтанная электрическая поляризация, подавляемая внешним полем, и гигантский магнитодиэлектрический эффект были зарегистрированы в  $\text{SmFe}_3(\text{VO}_3)_4$  [1]. Недавно обнаруженные значительные МЭ эффекты в гольмиевых алюмо- [2] и галлиевом [3] боратах инициировали изучение МЭ свойств других РЗ боратов с немагнитными ионами  $\text{M}^{3+}$ . Поскольку эти свойства зависят от кристаллического поля (КП), действующим на РЗ ион [4], важно знание параметров КП. Последние могут быть получены на основании спектроскопических данных по штарковской структуре уровней иона  $\text{R}^{3+}$ . В данной работе представлены такие данные для иона  $\text{Sm}^{3+}$  в кристалле  $\text{SmGa}_3(\text{VO}_3)_4$ .

Измерения проведены на монокристаллах и KBr-таблетках  $\text{SmGa}_3(\text{VO}_3)_4$  в спектральной области  $1800 - 23000 \text{ см}^{-1}$  при температурах в диапазоне 3-300 К при помощи фурье-спектрометра Bruker IFS125 и оптического криостата замкнутого цикла Cryomech PT403. Получена информация о штарковской структуре основного  $^6\text{H}_{5/2}$  и возбужденных  $^6\text{H}_{7/2}$ ,  $^6\text{H}_{11/2}$ ,  $^6\text{F}_{3/2}$ ,  $^6\text{F}_{5/2}$ ,  $^6\text{F}_{7/2}$ ,  $^6\text{F}_{9/2}$ ,  $^6\text{F}_{11/2}$ ,  $^4\text{F}_{5/2}$ ,  $^4\text{F}_{3/2}$  состояний иона  $\text{Sm}^{3+}$ . Проведено сравнение полученных данных для  $\text{SmGa}_3(\text{VO}_3)_4$  с опубликованными в литературе данными по изоструктурному соединению  $\text{SmFe}_3(\text{VO}_3)_4$ . Малое отличие ионных радиусов  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Ga}^{3+}$  приводит к тому, что ближайшее окружение иона самария мало отличается для указанных соединений. Вследствие этого следует ожидать, что эффекты кристаллического поля и, в частности, магнитные и МЭ свойства самариевой подсистемы в двух соединениях близки.

Работа поддержана Российским Научным Фондом (грант № 14-12-01033).

4. А.А. Мухин и др., Письма в ЖЭТФ **93**, 305 (2011).
5. К.-С. Liang, R. Chaudhury, et al., Phys. Rev. B **83**, 180417 (2011).
6. Н.В. Волков и др., Письма в ЖЭТФ **99**, 72 (2014).
7. A.I. Popov, D.I. Plokhov, A.K. Zvezdin, Phys. Rev. B **87**, 024413 (2013).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ФАЗЫ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ ПЭМ

Д.А. Павлов, А.В. Пирогов, Я.В. Куклина

*Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: kuklinayana2010@yandex.ru*

Кремний является одним из самых распространённых полупроводников, но существенным недостатком данного материала является непрямозонность. Существует множество политипов кремния, среди которых наименее изученным является его гексагональная модификация. При этом изменение кристаллической структуры кремния может привести к возникновению новых свойств данного материала. Например, работе [1] была обнаружена фотолюминесценция гексагональной фазы кремния.

Нами было исследовано формирование политипа кремния, содержащего гексагональную фазу, возникающую при его гетероэпитаксии на сапфировой подложке, а также при осаждении на окисленную поверхность кремния.

Возникновение в образцах КНС включений со структурой, отличной от структуры алмаза, связывается с образованием в кристаллической решетке кремния областей интенсивного двойникования, формирующих собственную кристаллическую структуру [2].

Согласно проведённым исследованиям, было определено, что данный политип кремния относится к политипу 9R [3]. Элементарная ячейка данного политипа состоит из 3 чередующихся периодов, каждый из которых состоит из одного фрагмента кубической упаковки и двух фрагментов гексагональной упаковки:  $(hkh)_3$ . Доля гексагональности данного политипа – 66,67%.

Для изучения свойств политипа кремния 9R была разработана методика определения его содержания в исследуемых образцах. Определение гексагональной фазы кремния основано на анализе снимков высокого разрешения. С помощью специального программного обеспечения были получены спектры пространственных частот и распределение интенсивности. По отношению пиков интенсивностей было определено содержание гексагональной фазы кремния в образцах.

На данном этапе мы планируем разработать технологический процесс контролируемого получения ориентированных слоёв, содержащих гексагональную фазу кремния.

1. J. Bandet, Appl. Phys. 234 (2002).
2. Д.А. Павлов и др., Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 4, (2013).
3. B. Wen et al., Diamond & Related Materials. 17, (2008).

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА  
ГАЛЛИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ИЗОВАЛЕНТНЫМИ ПРИМЕСЯМИ  
ИНДИЯ И ФОСФОРА, МЕТОДОМ ВРПЭМ

Е.И. Волкова<sup>1</sup>, Д.А. Павлов<sup>1</sup>, Н.В. Малехонова<sup>1</sup>, А.И. Бобров<sup>1</sup>,  
Д.С. Сорокин<sup>1</sup>, Н.В. Байдусь<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ,  
Нижний Новгород  
E-mail: [volkovaei@inbox.ru](mailto:volkovaei@inbox.ru)*

Интерес к гетероструктурам с квантовыми точками (КТ) In(Ga)As/GaAs обусловлен возможностью их применения как источников излучения в широком диапазоне длин волн. Однако оптоэлектронные свойства, а так же атомное строение таких структур во многом определяется распределением полей деформаций и упругих напряжений в них.

В данной работе методом газофазной МОС-гидридной эпитаксии в установке AIX 200RF была выращена структура со слоем КТ InAs/GaAs. В процессе роста перед осаждением индия производилось формирование захороненного дельта-слоя состава GaAs<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub> наличие которого, как предполагалось, создаст повышенные упругие деформации в области формирования КТ.

Полученный образец исследовался на просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения JEM-2100F. В результате были получены снимки в режиме непосредственно просвечивающего микроскопа (ПЭМ) и режиме сканирования (СПЭМ). И те, и другие позволяют определить наличие как сформированных КТ, так и область формирования фосфидного слоя. По СПЭМ изображениям были построены реальные профили распределения In и P в структуре. По ВРПЭМ снимкам с помощью метода геометрической фазы было получено распределение полей деформаций. Анализ данного распределения показывает, что положительная деформация относительно материала подложки наблюдается непосредственно в области КТ, обусловленная наличием In. Месторасположение же фосфидного слоя характеризуется относительным уменьшением периода решетки в направлении роста.

Т.о. введение в матрицу GaAs изовалентных примесей In и P позволяет создавать в решетке основного материала деформации разные не только по величине, но и по знаку, что может быть эффективно использовано при формировании массивов вертикально связанных КТ.

## ЗАВИСИМОСТЬ ОДНОРОДНОСТИ КРИСТАЛЛОВ $Zn(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ОТ СОСТАВА РАСТВОРА

А.Д. Гортинская, В.Н. Портнов, Д.А. Воронцов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [gortinskaya.anya@yandex.ru](mailto:gortinskaya.anya@yandex.ru)*

В настоящее время получение кристаллов, используемых на практике, в различных устройствах (в качестве пьезоэлементов, фильтров, нелинейно-оптических элементов) должно быть экономичным. Это означает, что кристалл, выращенный с меньшими затратами, должен быть достаточно однородным и совершенным [1]. С меньшими затратами можно вырастить кристалл нужного качества из вещества с низкой степенью очистки (это недорого), но применяя добавки (примеси) можно получить хорошие кристаллы.

Ранее проведенные опыты показали [2], что добавление соды улучшает качество кристаллов. Повышение качества кристаллов было подтверждено морфологическими исследованиями с помощью интерферометра Линника.

Целью работы было применение оптических методов для наблюдения движения ступеней на гранях  $\{110\}$  в присутствии разного количества  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$  и соды.

Наблюдение ступеней на гранях  $\{110\}$  проводилось с помощью фазово-контрастного микроскопа, интерферометра Линника и интерферометра Майкельсона. Проведены измерения скорости движения ступеней на гранях кристалла  $Zn(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ .

1. Н.Н. Шефталъ, *Сб. Рост кристаллов*, М.: Изд-во АН СССР, 1957.
2. А.Д. Гортинская, В.Н. Портнов, Сборник трудов 11-й Всероссийской с международным участием конференции-школы, Саранск (2012).
3. В.П. Портнов, Е.В. Чупрунов. *Кинетика и морфология дислокационного роста граней кристаллов из раствора*, Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2010.

## СТРУКТУРА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ZrO<sub>2</sub> СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

М.А. Борик<sup>1</sup>, В.Т. Бублик<sup>2</sup>, А.В. Кулебякин<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>1</sup>, В.А.Мызина<sup>1</sup>,  
Ф.О. Милович<sup>2</sup>, С.В. Серяков<sup>1,2</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский технологический университет*

*«МИСиС», Москва*

*E-mail: [ntabachkova@gmail.com](mailto:ntabachkova@gmail.com)*

Диоксид циркония, стабилизированный оксидом скандия, является перспективным материалом для использования в качестве мембран для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). Важными преимуществами ТОТЭ по сравнению с другими типами топливных элементов являются гибкость в выборе топлива, способность работать с обычным углеводородным топливом и отсутствие благородных металлов. Ионная проводимость в кристаллах стабилизированных Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выше, чем в кристаллах стабилизированных Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, но из-за возможных фазовых переходов проводимость не очень стабильна во время отжига при рабочих температурах. Важной задачей является создание электролита на основе твердых растворов кристаллах ZrO<sub>2</sub> - Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с высоким уровнем ионной проводимости и высокими термомеханическими свойствами, стабильными в течение длительного времени эксплуатации. Поэтому необходимо избежать фазовых переходов, а это возможно при частичном замещении Sc на Y или Ce. Можно ожидать, что дополнительное легирование оксидами иттрия и церия положительно скажется и на механических свойствах кристаллов. Цель работы – изучение структуры, фазового состава, механических свойств и проводимости в кристаллах ZrO<sub>2</sub> стабилизированных Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и дополнительно легированных Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CeO<sub>2</sub>.

Экспериментальные образцы монокристаллов на основе ZrO<sub>2</sub>, стабилизированных Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в диапазоне составов от 2 до 12 мол.%, были получены методом прямого высокочастотного плавления в холодном контейнере. Исследование структуры и фазового состава проводили методами рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии. Механические свойства, такие как микротвердость и трещиностойкость, измеряли методом микроиндентирования. Проводимость измеряли контактным методом в интервале температур от 25 до 750<sup>0</sup>С. В работе определены оптимальные, из выбранного диапазона составов, концентрации стабилизирующего оксида Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Показано изменение фазового состава твердых растворов ZrO<sub>2</sub> - Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при дополнительном легировании Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CeO<sub>2</sub> и влияние фазового состава на проводимость и механические свойства кристаллов. По разности теоретических и экспериментальных значений плотности проведена оценка концентрации вакансий в кристаллах. Установлена связь между фазовым составом, структурой и механическими свойствами исследуемых кристаллов.



# **ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

МОДИФИКАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ  
ПЬЕЗО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ  
С ПОМОЩЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.Г. Охримчук<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИЦВО РАН, Москва.

<sup>2</sup>Международный центр лазерных технологий, Российский химико-технологический университет им Д.И. Менделеева, Москва.

E-mail: [okhrim@fo.gpi.ru](mailto:okhrim@fo.gpi.ru)

Лазерный пучок фемтосекундного лазера ближнего ИК, сфокусированный в пятно размером порядка длины волны – инструмент для записи волноводов в кристаллах и стёклах [1,2]. Элементарной составляющей таких волноводов является трек изменённого показателя преломления, который образуется как след от перетяжки жёстко сфокусированного лазерного пучка в результате равномерного движения образца поперёк направления пучка. Во всех исследованных до настоящего времени стёклах и центрально-симметричных кристаллах, профиль изменения показателя преломления в плоскости, перпендикулярной треку, имеет форму, симметричную относительно оси распространения пучка [2], при условии зеркальной симметрии распределения интенсивности в самом пучке (в частности, при отсутствии наклона фронта интенсивности в фемтосекундном импульсе [3]). Геометрические параметры треков не зависят и от кристаллографического направления, в котором распространяется записывающий пучок в таких кристаллах и стеклах. Напротив, в пьезоэлектрических кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  и  $\beta\text{-BaB}_2\text{O}$ , принадлежащих к одной и той же пространственной группе симметрии  $3m$ , амплитуда изменения показателя преломления и структура треков зависят от кристаллографической ориентации образца относительно направлений пучка и движения образца [4,5].

В работе [4] исследовалась фемтосекундная модификация пластинки кристалла  $\text{LiNbO}_3$ , вырезанной перпендикулярно кристаллофизической оси  $Z$ , иттербиевым лазером с частотой повторения импульсов 200 kHz при распространении пучка вдоль оси  $Z$ . При движении образца вдоль оси  $Y$ , характер трека менялся при изменении направления движения на противоположное, а именно его однородность и даже знак изменения показателя преломления. При движении образца вдоль оси  $X$  не обнаружено различия в характеристиках треков, соответствующих противоположным направлениям движения. Исследования автора доклада пластинки кристалла  $\beta\text{-BaB}_2\text{O}$ , вырезанной аналогично, с помощью лазера на корунде с титаном с частотой повторения 1 kHz частично подтвердили наблюдения работы [4], а именно наблюдалась разница в гладкости треков, записанных вдоль осей  $Y$  и  $X$ .

С помощью того же лазера на корунде с титаном в работе [5] проведена фемтосекундная модификация пластинка  $\beta\text{-BaB}_2\text{O}$ , вырезанной перпендикулярно оси  $X$ . Исследования проводились как в режиме записи

треков, так и в режиме одиночных импульсов. Во всех случаях наблюдались ориентационные, а также и поляризационные зависимости. Очевидно одиночный режим упрощает общую картину происходящих при записи процессов и позволяет лучше разобраться в механизме ориентационных и поляризационных зависимостей, поскольку в этом случае становится несущественным один параметр эксперимента - направление сканирования. Наиболее драматические зависимости наблюдались при модификации пучком, соответствующим необыкновенной волне (Рис.1). А именно при наблюдении в свете необыкновенной волны профиль изменения показателя преломления меняет свой знак в области пятна модификации, а положительная и отрицательная области изменений связаны с симметрией решётки кристалла. До настоящего времени такой тип «антисимметричной» модификации наблюдался только в кристалле  $\beta$ -BaV<sub>2</sub>O.

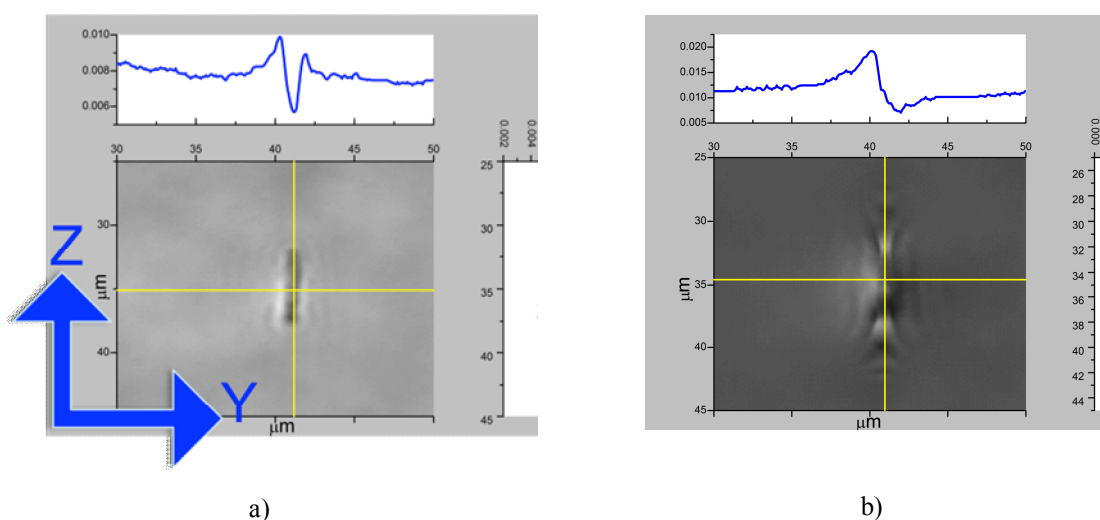


Рис.1. Микроскопический снимок распределения фазовой задержки для света длиной волны 0.5  $\mu\text{m}$  обыкновенной (а) и необыкновенной (б) волн в кристалле  $\beta$ -BaV<sub>2</sub>O, модифицированном одиночным импульсом необыкновенной волны. Фемосекундный модифицирующий пучок распространялся вдоль кристаллофизической оси X.

Решётки исследованных кристаллов имеют единственную плоскость симметрии, которая перпендикулярна оси X. Для этой оси диагональные коэффициенты пьезоэлектрического и электрооптического тензоров равны нулю. Поскольку описанные ориентационные и поляризационные особенности фемтосекундной модификации в кристаллах LiNbO<sub>3</sub> и  $\beta$ -BaV<sub>2</sub>O не наблюдаются как раз для этой оси, следует полагать, что анизотропия модификации и антисимметричное изменение показателя преломления имеют пьезоэлектрическую и электрооптическую природу.

1. K.M. Davis, K. Miura; N. Sugimoto, et al, Optics Letters **21**, 1729-1731 (1996).
2. A. Okhrimchuk, «Femtosecond fabrication of waveguides in ion-doped

laser crystals», in *Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission*, F.J. Duarte, ed., 519–542 InTech (2010).  
<http://www.intechopen.com/articles/show/title/femtosecond-fabrication-of-waveguides-in-ion-doped-lasercrystals>.

3. P. G Kazansky. et al., Appl. Phys. Lett. **90**, 151120 (2007).
4. W. Yang, P. Kazansky, Y.P. Svirko, Nature Photonics. **2**, 99-104 (2008).
5. A.G. Okhrimchuk, S.G. Grechin, A.E. Kokh, et al., Progress on Ultrafast laser modifications of Materials, Cargèse, Corsica, France, 14-19 April 2013.

## ПРОБЛЕМЫ И ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ИЗ РАСПЛАВА

Е.В. Жариков<sup>1,2</sup>

*Российский химико-технологический университет им. Д.И.  
Менделеева,*

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

*E-mail: [zharikov@rctu.ru](mailto:zharikov@rctu.ru)*

В докладе обсуждаются новые разработки в технологии выращивания кристаллов из расплава, предложенные, в основном, в последние пять-десять лет. Наибольшее внимание уделено прогрессу в области выращивания кристаллов диэлектриков. Рассматриваются вопросы масштабирования, увеличения размеров и выхода годных кристаллов при выращивании из расплава. Анализируются различные пути повышения кристаллического совершенства посредством гомогенизации состава расплава и управления тепломассопереносом в процессе роста кристалла. Обсуждается также новая ситуация с выращиванием и использованием монокристаллов в связи с появлением альтернативных технологий синтеза объемных кристаллических и квазикристаллических функциональных материалов, в частности, прозрачной керамики и стеклокерамики, а также в связи с развитием технологии получения монокристаллов в результате твердофазного превращения керамик.

# МЕТОД ВЫРАЩИВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ КРИСТАЛЛОВ ФТОРИДОВ, АКТИВИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ, НА РОСТОВОЙ УСТАНОВКЕ С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ «НИКА-3»

С.Н. Ушаков<sup>1,2</sup>, М.А. Усламина<sup>2</sup>, В.В. Осико<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>2</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск*

*E-mail: [userg@mail15.com](mailto:userg@mail15.com)*

Кристаллы фторидов находят широкое применение в твердотельных лазерах с самых первых экспериментов по получению лазерной генерации. Так, после создания рубинового лазера в 1960 г. Сорокиным и Стивенсоном был описан генератор на кристалле  $\text{CaF}_2$ , активированном ионами  $\text{U}^{3+}$ . Он излучал в ИК диапазоне на длине волны 2,6 мкм, а через год эти же авторы получили на кристалле  $\text{CaF}_2$ , активированном ионами  $\text{Sm}^{2+}$ , излучение в видимом диапазоне 0,7 мкм. Следует отметить, что это был первый лазер на редкоземельном ионе, которые в дальнейшем будут доминировать в большинстве лазерных кристаллов и стекол [1].

Кристаллы  $\text{CaF}_2$  имеют кубическую структуру (типа флюорита) обладают хорошими оптическими свойствами и в них легко вводятся примеси различных редких земель с образованием твердых растворов  $\text{CaF}_2\text{-YF}_3$  и  $\text{CaF}_2\text{-TR}^{3+}$ . Трехвалентный редкоземельный ион замещает в решетке ион  $\text{Ca}^{2+}$ , а избыточные ионы фтора размещаются в октаэдрических междоузлиях. В зависимости от способа компенсации избыточного положительного заряда редкоземельные ионы оказываются в кристаллографических позициях отличающихся друг от друга, как локальной симметрией, так и величиной кристаллического поля. Это приводит к образованию различных оптических центров и как следствие к сильному неоднородному уширению спектральных линий поглощения и люминесценции. Кроме того, распределение ионов  $\text{TR}^{3+}$  по катионным позициям решетки не является равновероятным, что приводит к образованию ассоциатов или кластеров [2]. Такой характер распределения  $\text{TR}^{3+}$  ионов по объему кристалла приводит к определенным особенностям межионного взаимодействия. Так как редкоземельные ионы активатора сгруппированы в кластеры взаимодействие между ними происходит на минимальном расстоянии (расстояние порядка элементарной ячейки) и процессы кросс-релаксации или ап-конверсии эффективны даже при небольших концентрациях активатора.

Процессы ассоциации-диссоциации структурных элементов с ионами  $\text{TR}^{3+}$  в кристаллах фторидов зависят как от самого редкоземельного иона, так и от состава матрицы ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$  или их твердые растворы). Кроме того на них влияют как условия выращивания кристаллов, так и последующая температурная обработка.

Таким образом, поиск новых составов кристаллов фторидов, соактивация их различными  $\text{TR}^{3+}$  ионами, оптимизация технологии роста и

последующей температурной или иной обработки по-прежнему остается актуальной задачей (несмотря на более чем 50 летнюю историю применения кристаллов фторидов в лазерах). А эта работа невозможна в свою очередь без расширения ростовой базы, создания новых и модификации имеющихся ростовых установок, разработки методик выращивания и температурной обработки.

Для решения этих задач в 2014 году в Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева совместно с Научным центром лазерных материалов и технологий ИОФ РАН образована "Лаборатория технологий оптических материалов". Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева предоставил отремонтированные помещения с подведенными коммуникациями, а НЦЛМТ ИОФ РАН - автоматизированную установку для выращивания кристаллов «НИКА-3». Эта установка предназначена для выращивания монокристаллов из расплава методами Чохральского и Степанова высокотемпературных окислов. Выращивание фторидных кристаллов с помощью этой установки стало возможным после ее модернизации. В состав установки была включена вакуумная система, включающая диффузионный насос, что позволило получать вакуум до  $10^{-5}$  mbar. Разработана и изготовлена тепловая зона из высокоплотного графита, работающая в условиях индукционного нагрева. Разработана конструкция тигля и система сопряжения его подвеса с верхним штоком установки.

Традиционно кристаллы фторидов выращиваются методом Бриджмена-Стокбаргера во фторирующей атмосфере, графитовых тиглях на установках с резистивным нагревом. В основе метода лежит перемещение тигля с расплавом кристаллизующего вещества через температурное поле с заданным градиентом. При этом температурный градиент и скорость перемещения тигля выбираются, исходя из условия устойчивости плоского фронта кристаллизации [3]. Температурные градиенты могут иметь значения от 10 до  $100^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ , а скорости перемещения от 0.5 до 15 мм/час.

Для выращивания фторидных кристаллов (в частности  $\text{CaF}_2$ ) на ростовой установке «НИКА-3» мы реализовали прямой индукционный нагрев тигля, помещенного внутри индуктора. Графитовый тигель цилиндрической формы имел 6 ростовых ячеек. Это позволяет одновременно выращивать кристаллы с разными активаторами или с различными концентрациями одного активатора. Дно ячейки имело коническую форму, что способствовало спонтанному зародышеобразованию и последующему росту монокристалла. Графитовые стенки ячейки служили формообразователем, для лучшего извлечения образцов они так же имели небольшую конусность. Температурный градиент формировался с помощью экранов, в качестве которых выступали графитовые трубы и диски. Они имели радиальные пропилены для исключения нагрева индукционными токами. Это позволило

получит температурный градиент (по температуре стенки тигля) около 30°C/см. Измерение температуры производили ручным ИК-пирометром через окна камеры.

Графитовый тигель подвешен на верхнем штоке с помощью графитового стержня. Программное управление ростовой установкой «НИКА-3» позволяет в широких пределах варьировать как скорость перемещения штока, так и его вращение.

После монтажа теплового узла и тигля на установке произведен их отжиг в высоком вакууме. Фторирование шихты и расплава в процессе роста кристаллов проводилось с помощью фторирующей атмосферы  $\text{SF}_4$ .

На модернизированной таким образом ростовой установке нами выращены серии кристаллов  $\text{CaF}_2$  активированных редкоземельными элементами: Yb, Er, Tm, Ho, Dy. Були кристаллов имели размер  $\text{Ø}14 \times 50$  мм. Оптическое качество кристаллов оценивалось как визуально (наличие включений, рассеивания света, наличия деполяризации), так и измерением спектров пропускания и оптических потерь на определенных длинах волн. Из некоторых булей, удовлетворяющих критериям качества, изготовлены активные элементы для твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой.

1. А.А. Каминский, *Лазерные кристаллы*, М.: Наука, 1975.
2. А.М. Прохоров, В.В. Осико, *Проблемы современной кристаллографии. Сборник статей памяти академика А.В. Шубникова*, М., Наука, 1975.
3. С.В. Кузнецов, П.П. Федоров, В.А. Конюшкин и др., *VII Международная конференция*. Кисловодск – Ставрополь: СевКавГТУ, 2007.



# ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ОКСИДОВ И ФТОРИДОВ

П.А. Попов

*Брянский государственный университет им. И.Г. Петровского, Брянск*  
*E-mail: [tfbgubry@mail.ru](mailto:tfbgubry@mail.ru)*

Высокая теплопроводность твердотельного материала является одним из важнейших условий функционирования активного лазерного элемента. Для получения необходимого комплекса генерационных и технологических характеристик лазерных кристаллов применяется легирование их ионами различных химических элементов. Однако легирование кристалла приводит обычно к снижению теплопроводности, особенно заметному при низких температурах [1]. Эффект снижения зависит от вида легирующих ионов, степени их сходства с ионами замещаемыми. В случае гетеровалентного ионного замещения сильное снижение теплопроводности является ожидаемым, хотя и трудно поддающимся количественной оценке. Причина этих трудностей связана с объективной сложностью процессов теплопереноса в твердых телах, ограниченностью существующих теорий теплопроводности, а также сложным характером структурной перестройки кристалла при кластеризации примеси.

В рамках фононной модели теплопереноса величина теплопроводности диэлектрических монокристаллов определяется произведением теплоемкости единицы объема, средней скорости звука и средней длины свободного пробега фононов [2]. Если первые две величины в достаточной мере поддаются априорной оценке, то длина пробега фононов весьма сильно и сложным образом зависит от структурных особенностей кристалла. Это делает величину теплопроводности нового материала трудно прогнозируемой. Поэтому экспериментальный метод определения теплопроводности является, безусловно, предпочтительным. С другой стороны, чувствительность теплопроводности, особенно в области низких температур и в случае малодефектных кристаллов, к проявлению различного рода механизмов фононного рассеяния позволяет применять методику экспериментального определения температурной зависимости теплопроводности в качестве весьма полезного инструментария для выявления структурных особенностей кристаллических материалов.

В Брянском госуниверситете экспериментально исследована температурная зависимость теплопроводности около 600 образцов различных твердотельных материалов. Установлено, что существующие теоретические представления не позволяют надежным образом прогнозировать поведение теплопроводности даже кристаллических матриц и тем более – легированных кристаллов и твердых растворов. Кроме того, выявлено немало случаев широкого использования далеких от

реальности сведений о величине теплопроводности кристаллических материалов (например, ортованадаты РЗЭ  $RVO_4$ , форстерит  $Mg_2SiO_4$ ).

Среди кристаллических матриц многие по теплопроводности превосходят долго считавшийся эталоном среди лазерных материалов иттрий-алюминиевый гранат [3] (см. рис. 1).

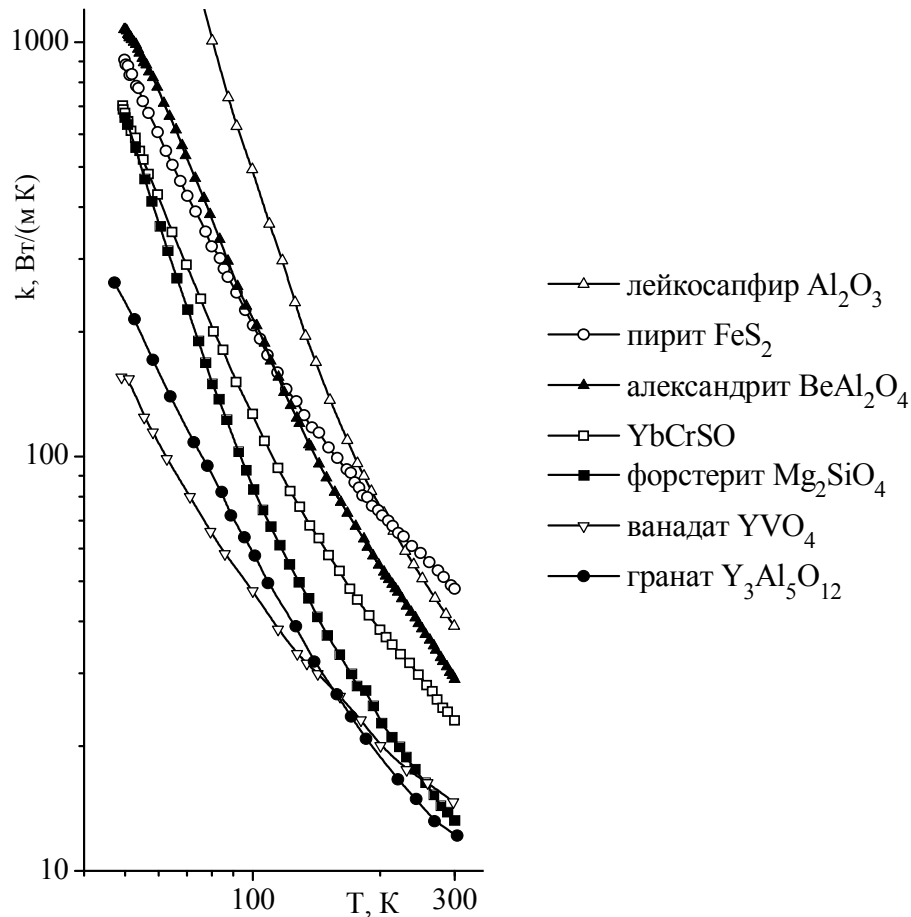


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности кристаллов, являющихся хорошими проводниками тепла.

Любое нарушение периодичности кристаллической структуры сопровождается фонов-дефектным рассеянием (снижением средней длины свободного пробега фононов) и соответствующим снижением коэффициента теплопроводности. Точечные дефекты замещения являются центрами фонов-ного рассеяния вследствие различий масс и размеров замещающих и замещаемых ионов. Рис. 2 демонстрирует проявление точечных дефектов при изовалентном замещении  $Ca^{2+} \leftrightarrow Sr^{2+}$  при образовании твердого раствора  $Ca_{1-x}Sr_xF_2$ .

Гораздо более существенное снижение теплопроводности имеет место в случае гетеровалентного ионного замещения вследствие образования крупных кластеров дефектов (см. рис. 3). Такие кластеры являются высокоэффективными центрами фонов-ного рассеяния.

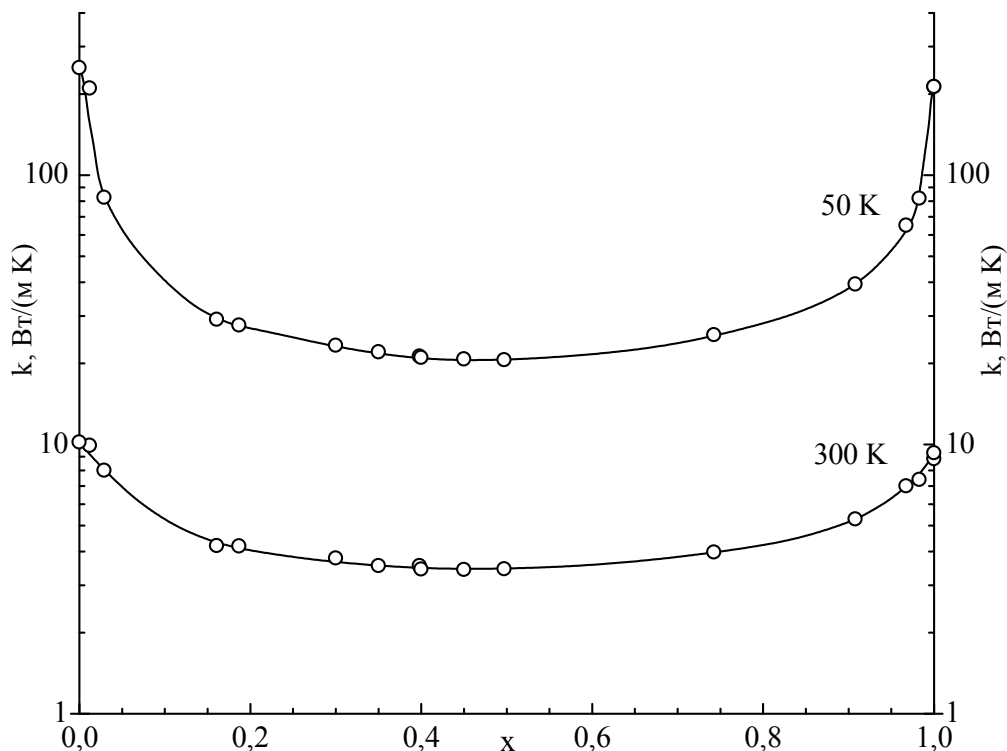


Рис. 2. Концентрационная зависимость коэффициента теплопроводности  $k(x)$  кристаллов  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$  при температурах  $T = 50 \text{ K}$  и  $300 \text{ K}$ .

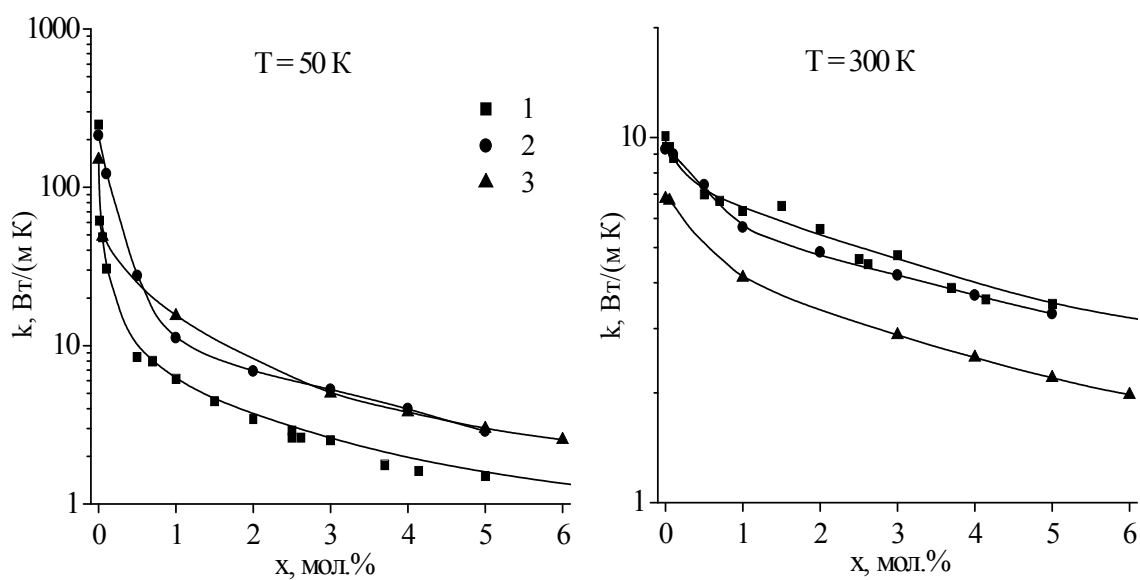


Рис. 3. Сравнение концентрационных зависимостей теплопроводности твердых растворов  $\text{M}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_{2+x}$ : 1 –  $\text{M} = \text{Ca}$ ; 2 –  $\text{M} = \text{Sr}$ ; 3 –  $\text{M} = \text{Ba}$ .

Различия преобладающих типов кластеров при легировании флюоритового кристалла различными РЗЭ определяют и различные эффекты в теплопроводности (см. рис. 4).

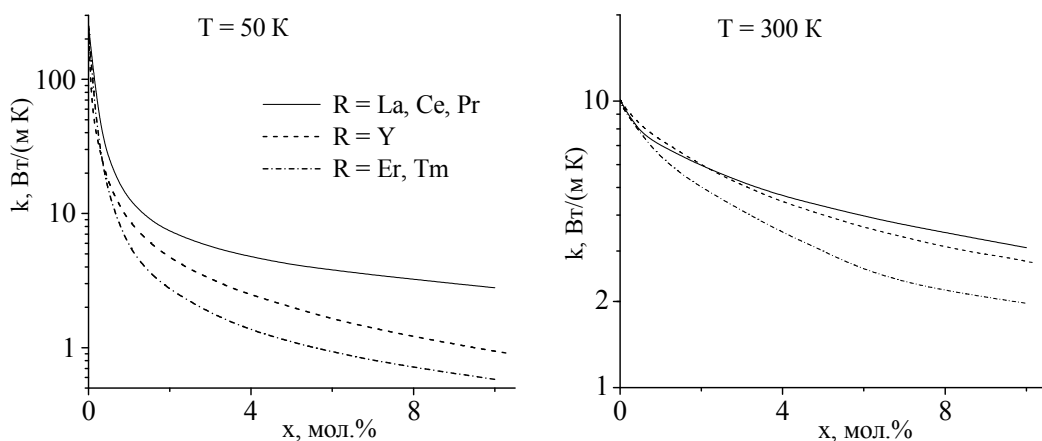


Рис.4. Сравнение концентрационных зависимостей теплопроводности твердых растворов  $\text{Ca}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ .

Существует разновидность оптического материала (оптическая керамика, «нанокерамика»), которая по теплопроводности идентична монокристаллическим аналогам [4, 5]. Тонкие межзеренные границы в этих материалах прозрачны как для фотонов, так и для тепловых фононов (рис. 5).

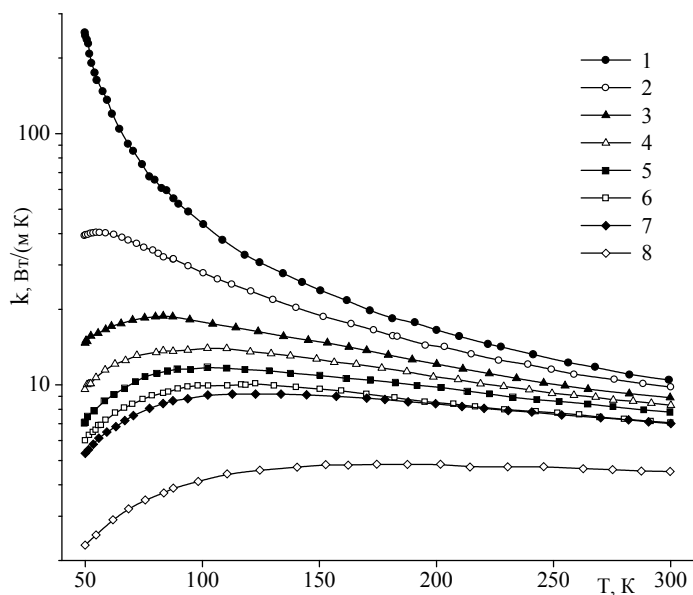


Рис.5. Температурная зависимость теплопроводности керамических образцов твердого раствора  $\text{Ca}_{1-x}\text{Ho}_x\text{F}_{2+x}$ : 1 –  $x = 0$ , 2 –  $x = 0.001$ , 3 –  $x = 0.003$ , 4 –  $x = 0.005$ , 5 –  $x = 0.007$ , 7 –  $x = 0.01$ , 8 –  $x = 0.03$  в сравнении с монокристаллом 6 –  $x = 0.01$ .

Более подробно результаты экспериментального исследования теплопроводности описаны в [6, 7].

Перечислим факторы, снижающие теплопроводность материала:

1. Низкая симметрия кристаллической решетки, отсутствие центра симметрии.
2. Ионное замещение в матричном составе.
3. Легирование.

4. Усложнение характера легирования – солегирование, переход к многокомпонентным составам.

5. Различия валентности, размеров и масс замещающих и замещаемых ионов.

6. Одновременное включение в состав ионов различной валентности.

7. Узкая область существования твердого раствора (малая максимальная концентрация примеси).

8. Отклонение коэффициента распределения ионов примеси от 1.

9. Наличие посторонних кристаллических фаз.

10. Наличие механических напряжений в кристалле.

11. Отклонение состава кристалла от стехиометрического.

12. Пористость керамики.

Укажем также пути и способы увеличения теплопроводности:

1. Выбор матричного состава кристалла, поиски новых матриц.

2. Выбор кристаллического направления оси активного лазерного элемента в случае анизотропного материала.

3. Минимизация содержания легирующих примесей при условии достижения необходимого комплекса генерационных и технологических характеристик кристалла.

4. Выбор оптимального соотношения компонент в случае концентрированных твердых растворов.

5. Упорядочение твердого раствора.

6. Выбор вида легирующих химических элементов с учетом валентности, ионного радиуса и массы.

7. Выбор области рабочих температур активного элемента в случае сильной температурной зависимости теплопроводности лазерного материала.

8. Термическая обработка (высокотемпературный отжиг) с учетом состава газовой атмосферы.

1. В.С. Оскотский, И.А. Смирнов *Дефекты в кристаллах и теплопроводность*, Л.: Наука, 1972.

2. Р. Берман, *Теплопроводность твердых тел*, М.: Мир, 1979.

A.I. Zagumeimy, G.V. Lutts, P.A. Popov et al., *Laser Physics*. **3**, 1064 (1993).

3. П.А. Попов, К.В. Дукельский, И.А. Миронов и др., Докл. РАН. **412**. 185 (2007).

4. П.А. Попов, П.П. Федоров, Е.А. Гарибин и др., Неорган. материалы. **48**. 588 (2012).

5. П.А. Попов, *Теплопроводность оптических оксидных кристаллов*, Брянск: Ладомир, 2010.

6. П.А. Попов, П.П. Федоров, *Теплопроводность фторидных оптических материалов*. Брянск: Группа компаний «Десяточка», 2012.

# ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ Cr:ZnSe НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 2.7 МКМ

О.Ю. Биткина, А.С.Егоров, А.П. Савикин, О.Н. Еремейкин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород

Лазеры с длиной волны генерации перестраиваемой в среднем ИК диапазоне находят свое применение в медицине, спектроскопии, промышленности и др. [1]. К активным средам, имеющих полосу усиления в области длин волн 2-3 мкм относятся кристаллы халькогенидов, легированные двухвалентными ионами  $\text{Cr}^{2+}$ . Работа посвящена экспериментальному исследованию однопроходного лазерного усилителя на поликристалле Cr:ZnSe.

Линейно-поляризованное излучение Tm:YLF-лазера (1), работающего в импульсно-периодическом режиме (длина волны генерации 1.9 мкм, длительность импульса 100 нс, частота следования 4.5 кГц), одновременно использовалось для накачки Cr:ZnSe-лазера (3,4,5) и усилителя (6) (рис.1). Образцы имели просветленные торцы и были закреплены в медную оправу через индиевую фольгу.

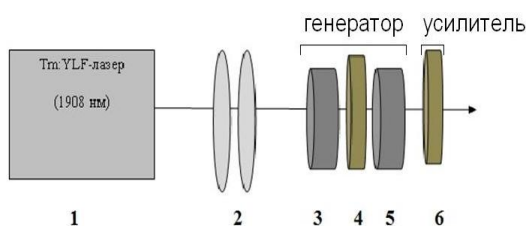


Рис.1.

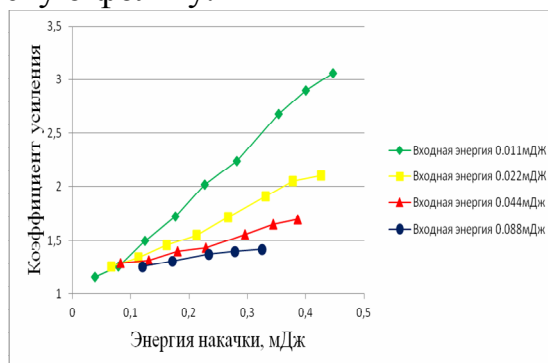


Рис.2

Согласно результатам проведенных измерений, были построены зависимости коэффициента усиления от энергии накачки (рис.2). Максимальное значение коэффициента усиления за один проход на длине волны 2.7 мкм достигалось при входной энергии 0.01 мДж и энергии накачки 0.4 мДж и составило величину  $K_{усил} \approx 3$ . Численные оценки значения коэффициента усиления с учетом эффекта насыщения соответствуют результатам эксперимента.

Проведенные исследования предполагается использовать для разработки мощных лазерных систем, работающих в диапазоне длин волн от 2 до 3 мкм.

1. S. Mirov, V. Fedorov, D. Martyshkin et al., Laser&Photon 4 (1), (2010).

# ФОТОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИСТАЛЛАХ $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$

А.И. Галиев, В.В. Семашко

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

E-mail: [almaz.galiev.isl@gmail.ru](mailto:almaz.galiev.isl@gmail.ru)

Твердотельные активные среды УФ диапазона спектра, использующие в качестве рабочих переходов  $4f^{n-1}5d-4f^n$  переходы редкоземельных ионов, в подавляющем большинстве испытывают деградацию оптических свойств под действием интенсивного УФ излучения накачки. Причиной этого являются многообразные фотодинамические процессы, возникающие в активированных материалах в результате одно- и многофотонного ступенчатого поглощения квантов накачки, образования, эволюции и деструкции центров окраски различной природы, фоторефрактивного и других сходных эффектов [1].

Данная работа является составной частью исследований фотодинамических процессов в церий-активированных фторидных кристаллах. Целями работы является создание компьютерной модели и пакета программ, позволяющих либо рассчитывать характеристики пропускания возбужденных образцов по известным параметрам используемой активной среды, либо находить ранее неизвестные ее параметры по экспериментальным зависимостям коэффициента пропускания от условий накачки и зондирования, а также исследование изучения нелинейного поглощения излучения накачки в кристаллической активной среде  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$ .

Методами *pump-probe* спектроскопии были зарегистрированы зависимости коэффициента поглощения и усиления кристаллов  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$  в области  $4f \leftrightarrow 5d$  переходов ионов  $\text{Ce}^{3+}$  от интенсивностей излучений накачки и зондирования. Интерпретация полученных зависимостей осуществилась с использованием теоретической модели фотодинамических процессов, описанной в [1]. Модель включала в себя четырех уровневую схему лазерного генератора, дополненной переходами из возбужденных состояний в зону проводимости кристаллической матрицы, рекомбинационными процессами и процессами образования и деструкции центров окраски.

В итоге были впервые определены сечения фотоионизации ионов  $\text{Ce}^{3+}$  из его возбужденного  $5d$ -состояния и скорости рекомбинационных процессов свободных носителей заряда в кристаллах  $\text{LiCaAlF}_6$ . Результаты исследований и разработанное программное обеспечение могут быть использованы в дальнейших работах по проектированию лазерных генераторов на основе активной среды  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$ , а также для исследований фотодинамических процессов в других активированных материалах.

1. В.В Семашко, ФТТ **47** (5), 1450 (2005).

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ  
ЛАНТАНОБОРОГЕРМАНАТНОГО СТЕКЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ  
РЕЖИМАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

Т.О. Гельманова<sup>1</sup>, С.В. Лотарев<sup>1</sup>, А.С. Липатьев<sup>1</sup>, П.Г. Казанский<sup>1,2</sup>,  
В.Н. Сигаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Международный центр лазерных технологий  
РХТУ им Д.И. Менделеева, Москва*

<sup>2</sup>*Университет Саутгемптона, Саутгемптон, Великобритания  
E-mail: [gelmanova@bk.ru](mailto:gelmanova@bk.ru)*

Одним из наиболее перспективных на сегодня методов формирования трехмерных элементов интегральной оптики в стеклах является их модифицирование фемтосекундным лазером. При соответствующем выборе состава стекла этот метод позволяет не только получать микрообласти с измененным показателем преломления, но и формировать ориентированные кристаллические структуры сложной конфигурации, состоящие из нелинейно-оптических кристаллов. При этом формирование протяженных кристаллических структур требует предварительного выращивания микроразмерного «затравочного» кристалла неподвижным пучком.

В данной работе были исследованы условия роста кристаллов в лантаноборогерманатных стеклах вблизи состава сегнетоэлектрика  $\text{LaBGeO}_5$ , в том числе допированных активатором люминесценции  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , с составами  $x\text{Nd}_2\text{O}_3 \cdot (25-x)\text{La}_2\text{O}_3 \cdot 25\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 50\text{GeO}_2$  ( $x=0, 1, 3$ ) под действием фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 1030 нм, длительностью 290 фс и частотой следования до 100 кГц при средней мощности до 5 Вт. За счет сравнительно большой энергии импульса удалось впервые продемонстрировать рост кристаллов в области перетяжки пучка в глубине образца стекла при частоте следования 100 кГц и менее, вплоть до 9 кГц при максимальной доступной нам энергии импульса. Ранее считалось, что рост кристаллов и требуемый для этого эффект фемтосекундного лазерного нагрева стекла реализуются лишь при частотах следования импульсов выше 200 кГц. Установлены зависимости времени возникновения кристаллов от условий облучения: энергии, количества и частоты следования импульсов, глубины расположения перетяжки пучка, – а также от состава стекла. Показано, что для каждой частоты следования импульсов существует определенный интервал энергий импульса, в котором возможен рост кристаллов при стационарном облучении.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант 14.Z50.31.0009) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 14-03-00931 и 13-03-01018).



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПСЕВДОСИММЕТРИИ КРИСТАЛЛОВ КТР, ЛЕГИРОВАННЫХ ГАФНИЕМ

А.П. Гажулина, Е.А. Исупова, М.О. Марычев  
*Нижегородский государственный университет им. Н.И.  
Лобачевского,  
Нижний Новгород*  
*E-mail: [evgeniya.isupova@yandex.ru](mailto:evgeniya.isupova@yandex.ru)*

На модельных структурах суперячеек кристаллов титанил-фосфата калия, легированных гафнием (КТР:Hf), рассчитана концентрационная зависимость степени инвариантности электронной плотности [1] относительно операции инверсии (псевдоинверсия). Проведено сравнение этой зависимости с известным поведением интенсивности генерации второй гармоники лазерного излучения на порошковых образцах КТР:Hf [2].

Для создания моделей примесных кристаллов и расчета псевдосимметрии их структуры использовалась программа PsAnalyser [3].

Модельная примесная структура КТР:Hf содержит 64 исходные элементарные ячейки; атомы гафния входят в обе существующие в структуре независимые позиции атомов титана равновероятно. Диапазон изменения концентрации гафния от 0 ат.% до 30 ат.% с шагом в 1 %. Для каждой концентрации Hf смоделировано по 1000 структур, различающихся положением примеси в суперячейке. В качестве предполагаемого центра псевдоинверсии выбрана точка с координатами (0.25; 0.25; 0.25) в элементарной ячейке. Такой выбор связан с тем, что в centrosymmetric фазе кристаллов КТР (при высоких температурах), центр инверсии имеет координаты (0.25; 0.25; 0.25) [4].

Полученная концентрационная зависимость для смоделированных структур имеет существенный локальный минимум при содержании гафния порядка 10-15%. Наличие минимума псевдоинверсии согласуется с поведением концентрационной зависимости интенсивности генерации второй гармоники лазерного излучения, имеющей максимум вблизи 6%, однако их экстремумы не совпадают. Вероятной причиной расхождения координат экстремумов на данных зависимостях может являться то, что в кристаллах КТР гафний преимущественно заселяет вторую титановую позицию [2], таким образом, использование при моделировании структур равновероятного заселения неэквивалентных позиций титана гафнием даёт лишь начальное приближение.

1. E.V. Churrunov, Crystallography Reports **52**(1), 1 (2007).
2. Е.И. Орлова, Е.П. Харитоновна, Н.Е. Новикова и др., Кристаллография **55**(3), 440–447 (2010).
3. И.Н. Лозгачев, Н.В. Сомов, Вестник ННГУ **5**, 231-237 (2013)
4. А.П. Гажулина, М.О. Марычев, Кристаллография **57**(6), 897–910 (2012).

# ЭФФЕКТИВНЫЙ И КОМПАКТНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ ЛАЗЕР, ИЗЛУЧАЮЩИЙ В ОБЛАСТИ ДЛИН ВОЛН

2,8 мкм И 3,3 мкм

Н.Г. Захаров<sup>1</sup>, Ю.Н. Фролов<sup>1</sup>, С.Д. Великанов<sup>1</sup>, А.В. Мухин<sup>1</sup>,  
К.В. Воронцов<sup>1</sup>, А.В. Ларионов<sup>1</sup>, В.А. Гарюткин<sup>1</sup>, Ю.В. Коростелин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н.Лебедева, Москва

E-mail: Nikitagz@rambler.ru

Высокоэффективные импульсно-периодические твердотельные лазеры, генерирующие излучение в трёхмикронном диапазоне длин волн, имеют ряд практических применений, в том числе при мониторинге атмосферы и дистанционном зондировании утечек углеводородов из магистральных газопроводов [1]. Кроме того, данное излучение идеально подходит для накачки перспективных лазеров на кристаллах  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ . Настоящий доклад посвящён экспериментальному исследованию и численному моделированию высокоэффективного и компактного твердотельного лазера на основе монокристалла  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ , генерирующего в диапазонах длин волн 2,8 мкм и 3,35 мкм.

В экспериментах применялся активный элемент из монокристаллического  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ , выращенный из паровой фазы и имеющий концентрацию ионов  $\text{Cr}^{2+} \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Длина активного элемента составляла 4,5 мм, а толщина - 1,5 мм. Для накачки  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  использовалось импульсно-периодическое излучение  $\text{Tm}:\text{YAlO}_3$  лазера с длиной волны 1,99 мкм и мощностью до нескольких Вт. При этом частота следования импульсов варьировалась от 5 кГц до 10 кГц, а их длительность составляла 100–300 нс. Линейный резонатор формировался двумя зеркалами: входным плоским дихроичным зеркалом и выходным сферическим зеркалом с кривизной  $R=200$  мм. Для получения генерации в различных диапазонах длин волн, применялись зеркала резонатора с соответствующими спектральными характеристиками. Более точная настройка спектра излучения в области 3,3 мкм осуществлялась с помощью фильтра Лио.

В исследуемом лазере была получена импульсно-периодическая генерация в области 2,85 мкм с эффективностью преобразования накачки, поглощённой в кристалле, более 50%. В диапазоне 3,3 мкм эффективность преобразования накачки, поглощённой в кристалле, составила более 25%. В зависимости от спектральных характеристик зеркал ширина линии генерации варьировалась от 15 нм до 100 нм. С помощью фильтра Лио было реализовано сужение спектра выходного излучения и точная настройка на линии поглощения этана или метана.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-2896.2013.2.

1. В.О. Петухов, В.А. Горобец, Квантовая электроника **40**, 2, 173 (2010).

# ДИСКОВЫЙ Nd:GGG ЛАЗЕР С МНОГОПРОХОДОВЫМ РЕЗОНАТОРОМ И СТРЕХЗОННОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Г. А. Буфетова, Д. А. Николаев, М. Н. Пивкина, В. Б. Цветков  
*Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук,*  
*Москва*

*E-mail: [mpmsu@mail.ru](mailto:mpmsu@mail.ru)*

Получения эффективной генерации мощного лазерного излучения с высокими пространственными и спектральными характеристиками является актуальной задачей лазерной физики. Одним из наиболее существенных факторов, ограничивающих эффективность генерации и качество выходного излучения мощных твердотельных лазеров с диодной накачкой, является термолинза. Использование дисковых активных элементов позволило в определенной степени уменьшить влияние этого негативного фактора [1]. К дальнейшему снижению тепловой нагрузки на активный элемент может привести использование многопучковой оптической накачки. При этом необходимо создание таких условий, при которых все активные (с инверсной населенностью) области диска будут принимать согласованное участие в процессе генерации выходного излучения лазера. Кроме этого необходимо, чтобы выходное излучение было представлено в виде одного пучка. Для удовлетворения этих требований нами была предложена схема многопроходового трехзеркального резонатора, в котором все области накачки связаны между собой внеосевым пучком. Оптическая схема и ход лучей в этом резонаторе представлена на Рис. 1

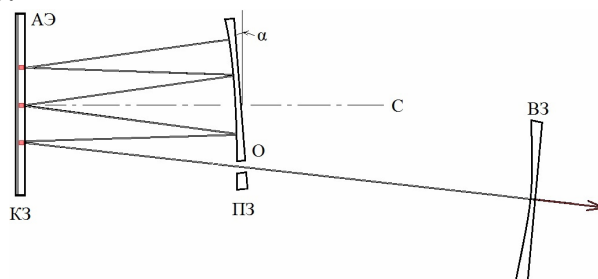


Рис. 1. Оптическая схема и ход лучей в трехзеркальном резонаторе: АЭ – активный элемент; КЗ – высокоотражающее зеркало, нанесенное на поверхность активного элемента; ПЗ – промежуточное зеркало;  $\alpha$  – угол наклона ПЗ; О – отверстие; ВЗ – выходное зеркало; С – ось резонатора.

Результаты наших измерений показывают, что предложенная оптическая схема позволяет реализовать одномодовое излучение лазера с КПД практически не уступающим простому линейному резонатору. При этом возможности охлаждения активного диска выше за счет большей площади тепловыделяющей области (три пятна вместо одного). Наши измерения показывают, что выходное излучение имеет достаточно высокие энергетические и пространственные характеристики пучка.

1. A. Giesen, H. Hugel, A. Voss et al., J. Appl. Phys. **58**, 365-372 (1994).
2. С.Н. Chen, P.Y. Huang and C.W. Kuo, J. Opt. **12**, 015708 (2010).

# ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ $\text{CaF}_2:\text{Ce}^{3+}$ , СОАКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ $\text{Yb}^{3+}$ И $\text{Lu}^{3+}$

Н.Ф. Рахимов, А.С. Низамутдинов, В.В. Семашко, М.А. Марисов,  
С.А. Шнайдман

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*  
*E-mail: niyaz\_06@mail.ru*

Кристаллы  $\text{CaF}_2:\text{Ce}^{3+}$  обладают перспективными с точки зрения получения перестраиваемой лазерной генерации УФ диапазона оптические характеристики, однако при этом их фотохимическая стабильность низка [1, 2].

Целью настоящей работы является исследование влияния соактивации ионами  $\text{Yb}$  и  $\text{Lu}$  на оптические характеристики и фотодинамические процессы в кристаллах  $\text{CaF}_2:\text{Ce}^{3+}$ . Для этого были зарегистрированы спектральные характеристики серии образцов флюоритов, активированных ионами  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Lu}^{3+}$ , в том числе спектры поглощения центров окраски, наведенных излучением, резонансным переходом ионов  $\text{Ce}^{3+}$ .

Показано, что в результате соактивации ионами  $\text{Lu}^{3+}$  появляются новые полосы в спектрах люминесценции ионов  $\text{Ce}^{3+}$ , что обусловлено увеличением доли примесных центров ионов  $\text{Ce}^{3+}$  различной конфигурации [3].

Однако при этом увеличение концентрации ионов  $\text{Lu}^{3+}$  в этих кристаллах приводит к подавлению процесса образования примесных центров ионов  $\text{Yb}^{2+}$ , что уменьшает оптические потери в области люминесценции ионов  $\text{Ce}^{3+}$ . Таким образом, показано, что кристаллохимический метод подавления паразитных фотодинамических процессов повышает перспективность кристаллов  $\text{CaF}_2:\text{Ce}^{3+}$ , как активных сред лазеров УФ диапазона.

1. G. J. Pogatshnik, D. S. Hamilton, Phys. Rev. B. **36** (16), 8251–8257 (1987).
2. R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva, A. S. Nizamutdinov et al., Proc. SPIE, 6054, (2006).
3. M. Yamaga, S. Yabashi, J.–P.R. Wells et al., J. of Lumin. **108**, 307-311 (2004).

## ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОУПЛОТНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО СТЕКЛА

М.М. Сергеев, Г.К. Костюк, Р.А. Заколдаев, Е.Б. Яковлев  
*Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург*  
*E-mail: [zakoldaev@gmail.com](mailto:zakoldaev@gmail.com)*

Высококремнеземные пористые стекла (ПС) обладают уникальными сорбционными и оптическими свойствами, что позволяет им найти широкое применение в науке и технике. ПС используют не только в традиционных направлениях химии и биологии, но и в оптическом приборостроении для создания устройств лазерной техники, гомогенизаторов и волноводных структур и устройств на их основе в интегральной оптике [1]. Благодаря развитой внутренней структуре, ПС широко используют в качестве матриц для нанокompозитов. Для изделий из ПС характерен процесс «старения», проявляющийся в уменьшении пропускания в видимом диапазоне спектра обусловленной адсорбцией углекислого газа и органических соединений из воздуха сложной, развитой внутренней структурой материала [2].

В настоящей работе предлагается предотвратить процесс «старения» пластин ПС созданием тонких термоуплотненных слоев на широких поверхностях пластины. Все этапы эксперимента по термоуплотнению поверхности пластин ПС проводились на макете установки, оснащенной иттербиевым волоконным лазером с длиной волны излучения 1.06 мкм, длительностью импульса ~100-200 нс, с частотой следования импульсов 20-100 кГц, излучение которого позиционировалось с помощью 2-х осевого сканатора (рис. 1).

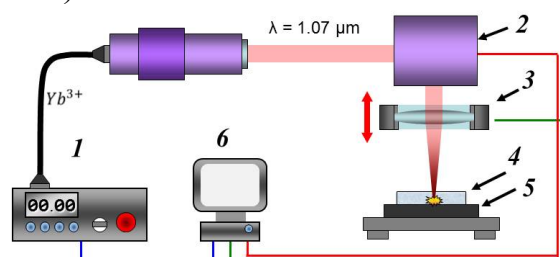


Рис. 1. Экспериментальная установка для лазерного термоуплотнения поверхности пластин ПС: 1 – лазер, 2 – гальванометрическая сканирующая система, 3 – объектив, 4 – ПС, 5 – прессованный графит.

Как было установлено из исследований, тонкие термоуплотненные слои (30-50 мкм) на поверхности пластины ПС не влияли на внутреннюю структуру и позволяли сохранить оптические свойства ПС в течение периода исследования, продолжающегося более одного года.

1. О. В. Мазурин, и др., Двухфазные стекла: структура, свойства, применение, Л.: Наука, (1991).
2. S. Zhou, W. Lei, N. Jiang, et al., Journal of Materials Chemistry **19** (26), 4603 (2009).

ВЫРАЩИВАНИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ  
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СО СТРУКТУРОЙ КОЛЬКВИРИИТА  
 $\text{LiCa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{AlF}_6$ , АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ  $\text{Ce}^{3+}$

А.А. Шавельев, А.С. Низамутдинов, В.В.Семашко, М.А. Марисов  
*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*  
*E-mail: alexey.shavelev@gmail.com*

Фторидные кристаллы, активированные редкоземельными ионами, перспективны в качестве активных сред твердотельных лазеров [1]. Значительное неоднородное колебательное уширение рабочих лазерных переходов этих ионов обуславливает широкую полосу перестройки лазерной генерации, а также возможность генерации импульсов ультракороткой длительности [2].

Целью работы являются синтез материалов на основе фторидных кристаллов со структурой кольквириита состава  $\text{LiMeAlF}_6$  ( $\text{Me} = \text{Ca}, \text{Sr}$ ), активированных ионами  $\text{Ce}^{3+}$ , и их твердых растворов, а также исследование их оптических свойств.

В результате экспериментов были установлены параметры процесса роста кристаллов твердых растворов состава  $\text{LiCa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{AlF}_6$ . Исследования рентгеновской дифракции показали, что синтезированные кристаллы ряда  $\text{LiCa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{AlF}_6$  с переменным соотношением компонент  $\text{CaF}_2$  и  $\text{SrF}_2$  являются однофазными монокристаллами со структурой кольквириита.

Исследования методами оптической спектроскопии при комнатной и низкой температурах, выявили три оптически неэквивалентных примесных центра ионов  $\text{Ce}^{3+}$  в кристаллах  $\text{LiCa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{AlF}_6$ . В сравнении с кристаллом  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$  для кристалла  $\text{LiCa}_{0,2}\text{Sr}_{0,8}\text{AlF}_6:\text{Ce}^{3+}$  центры, люминесцирующие в более коротковолновой области, имеют более широкую полосу люминесценции - 275-320 нм. Также важным результатом является большее значение коэффициента поглощения ионов  $\text{Ce}^{3+}$  в кристалле  $\text{LiCa}_{0,2}\text{Sr}_{0,8}\text{AlF}_6$  ( $20 \text{ см}^{-1}$  в области 270 нм) по сравнению с кристаллом  $\text{LiCaAlF}_6$  ( $6 \text{ см}^{-1}$  в области 270 нм) при одном и том же количестве компонента шихты  $\text{CeF}_3$  в расплаве (1 ат. %). Очевидно, что в кристалле происходит перераспределение образующихся примесных центров в сторону образования более коротковолновых, при этом увеличивается коэффициент распределения примеси в кристаллах.

1. М.А. Dubinskii, V.V. Semashko, A.K. Naumov, et al., J. Modern Opt. **40**, 1-5 (1993).
2. N. Sarukura, Z. Liu, H. Ohtake, Y. Segawa et al., Opt.Lett. **22**, 994-996 (1997).

# КРИСТАЛЛЫ ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ, АКТИВИРОВАННЫЕ ТУЛИЕМ, ЭРБИЕМ, ИТТЕРБИЕМ И ДИСПРОЗИЕМ, ВЫРАЩЕННЫЕ НА УСТАНОВКЕ «НИКА-3»

С.Н. Ушаков<sup>1,2</sup>, М.А. Усламина<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск*

<sup>2</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

*E-mail: [uslaminam@mail.ru](mailto:uslaminam@mail.ru)*

Целью работы являлось выращивание ряда монокристаллов  $\text{CaF}_2$ , активированных РЗЭ, определение их состава, оценка качества, измерение оптических и спектроскопических свойств. Преимуществами  $\text{CaF}_2$  являются прозрачность в УФ и ИК - областях спектра от 0,125 до 9 мкм. По сравнению с  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{LiF}$  фторид кальция имеет малую растворимость в воде при комнатных температурах. При нормальных условиях эксплуатации (влажности и температуре) полированные поверхности  $\text{CaF}_2$  остаются стабильными в течение нескольких лет.

Методика заключается в выращивании монокристаллов из расплава методом Бриджмена-Стокбаргера во фторирующей атмосфере на автоматизированной установке для выращивания монокристаллов из расплава «НИКА-3».

Метод Бриджмена-Стокбаргера, или метод направленной кристаллизации, заключается в том, что через печь, имеющую неравномерное распределение температуры по длине, протягивается тигель с материалом (в данной работе, фторид кальция и фторид редкоземельного элемента, например, фторид тулия 3 мол.%). Для исключения образования оксифторидов кальция шихта фторируется. В данной работе используется газ  $\text{CF}_4$  в отличие от методики, применяемой в ИОФ РАН, где создание фторирующей атмосферы осуществляют продуктами пиролиза тефлона. Тигель с расплавом перемещается в печи (протяжка задается компьютерной программой "Auga") из высокотемпературной области в низкотемпературную. Выращенный монокристалл, имеет форму ячейки тигля. При этом надо отметить, что за один процесс роста возможно вырастить несколько кристаллов размерами: Ø14 мм и длиной 40-90 мм, с различными концентрациями активатора или с разными РЗЭ. В качестве перспективных материалов для создания лазеров видимого и ближнего ИК-диапазона выступают кристаллы  $\text{CaF}_2$ , активированные Тм, Ер, Yb. В данной работе были представлены первые результаты нашего исследования кристаллов  $\text{CaF}_2$ -ТмF<sub>3</sub>, ЕрF<sub>3</sub>, YbF<sub>3</sub>, DyF<sub>3</sub> (2-5 мол.% активирующей добавки). Проведена качественная оценка внешнего вида (все кристаллы прозрачные, однородны по показателю преломления), исследованы спектроскопические характеристики. Из ряда выращенных кристаллов изготовлены активные элементы для лазеров с полупроводниковой накачкой.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГЗ Министерства образования и науки РФ (Задание № 3.384.2014/К).

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МОЛИБДАТАХ  
И ВОЛЬФРАМАТАХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ:  
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ  
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Ю.К. Воронько, А.А. Соболев, В.Е. Шукшин

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

*E-mail: [shukshinve@lst.gpi.ru](mailto:shukshinve@lst.gpi.ru)*

В процессе поиска оптимальных условий синтеза нелинейных кристаллов трибората лития методами спектроскопии спонтанного комбинационного рассеяния света был изучен целый класс соединений с различным соотношением оксидов щелочных металлов и оксида молибдена (вольфрама). Актуальность подобных исследований обусловлена использованием молибдатов щелочных металлов в качестве флюсов при синтезе перспективных монокристаллических материалов нелинейной оптики. А спектроскопия комбинационного рассеяния света является простым и информативным методом получения достоверных сведений о структуре и её изменениях в процессах фазовых преобразований по характеристическим колебаниям анионных молибден- и вольфрам-кислородных группировок с сильной ковалентной связью, сохраняющих целостность даже в расплавленном состоянии. Методика и аппаратура для регистрации спектров КРС при высоких температурах разработана и успешно применяется в нашей лаборатории уже достаточно длительное время [1].

Получены температурные серии спектров КРС молибдатов и вольфраматов щелочных металлов (как кристаллизующихся в виде соединений, так и промежуточного состава) в широком температурном интервале: от комнатных температур – до перегретых расплавов. На основании анализа спектров комбинационного рассеяния сделаны выводы о строении и структурных преобразованиях в изученных материалах при условиях имитирующих технологические процессы выращивания кристаллов. Обнаружено, что сложный мотив анионных группировок из соединенных между собой тетраэдров и октаэдров трансформируется при плавлении в цепочки переменной длины, состоящие из тетраэдрических анионов, соединённых общими вершинами. Для промежуточных составов методом «молота и наковальни» получены стеклообразные образцы, демонстрирующие структуру, характерную для соответствующих расплавов. Идентифицированы характеристические колебания основных анионных мотивов в исследованных соединениях и составах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-00707 а.

1. Ю.К. Воронько, А.Б. Кудрявцев, В.В. Осико и др., Сб. Рост кристаллов **16**, 178 (1988).



## МАЗЕР С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА ОСНОВЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ СПИНОВЫХ ВОЛН

А.С. Абрамов, И.О. Золотовский, Д.И. Семенцов

*Ульяновский государственный университет, Ульяновск*

*E-mail: aleksei\_\_abramov@mail.ru*

В работе предложена модель мазера с распределенной обратной связью (РОС), работающего на основе нелинейного 4-х магнотного взаимодействия. Рассмотренная структура состоит из пленки ЖИГ (длина  $l = 3$  см, толщина  $d = 15$  мкм), нанесенной на подложку из ГГГ. На пленке вытравлена система канавок с периодом  $\Lambda = 400$  мкм. Длина пленки подбиралась таким образом, чтобы на ней укладывалось не менее 50 периодов. При поперечном (относительно магнитного поля) распространении в такой системе двух мощных МСВ накачки с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  за счет 4-х магнотного взаимодействия возникают две маломощные волны с частотами  $\omega_3$  и  $\omega_4$ , причем  $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ . При распространении в пленке двух МСВ с одинаковыми частотами  $\omega_1 = \omega_2 = 6.45 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup> образуется «сигнальная» МСВ, которая в дальнейшем может быть усилена. Так, образование «сигнальной» МСВ с частотой  $\omega_4 = 6.5 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup> приведет к возникновению «холостой» МСВ с частотой  $\omega_3 = 6.4 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup>. Возникающая отстройка при этом нелинейном параметрическом взаимодействии устраняется подбором определенного периода структуры.

В спектрах прохождения поверхностных МСВ через подобную структуру были обнаружены полосы непропускания для частоты, определяемой периодом структуры. Для волны, частота  $\omega_4$  которой попадает в полосу непропускания, периодическая структура играет роль резонатора, что позволяет на ее основе создать генератор МСВ, который может рассматриваться как РОС-мазер. Периодическая структура канавок позволяет избавиться от трех частот, оставив в резонаторе только сигнальную с частотой, лежащей в запрещенной зоне. Показано, что коэффициентом параметрического усиления такого мазера можно эффективно управлять как за счет выбора мощности волн накачек, так и при помощи внешнего магнитного поля. Для генерируемой МСВ с сигнальной частотой  $\omega_4 = 6.5$  ГГц выявлены две такие полевые области: (2220 – 2250) Э и (2350 – 2500) Э. Также установлено влияние потерь на условия генерации, рассмотрены случаи больших и малых потерь.

При достижении достаточно больших значений параметрического усиления  $g \approx 100$  см<sup>-1</sup> рассматриваемую систему целесообразно использовать не для генерации СВЧ сигналов, а для их усиления.

# ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОЛЯРИТОНЫ В СИСТЕМЕ ДИЭЛЕКТРИК – НЕЛИНЕЙНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.С. Паняев, Д.Г. Санников, Д.И. Семенцов

Ульяновский государственный университет, Ульяновск

E-mail: [panyaev.ivan@rambler.ru](mailto:panyaev.ivan@rambler.ru)

В докладе будут рассмотрены особенности распространения поверхностных поляритонов (ПП) в системе диэлектрик – нелинейный полупроводник (п/п). Линейный диэлектрик в исследуемом диапазоне имеет скалярную диэлектрическую проницаемость (ДП)  $\varepsilon_d$ , не зависящую от частоты. Во внешнем поперечном магнитном поле п/п проявляет анизотропию своих оптических свойств. Для волны ТМ типа, управляемой магнитным полем, эффективной ДП п/п является  $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_s - \varepsilon_a^2 / \varepsilon_s$ , где  $\varepsilon_s$  и  $\varepsilon_a$  - диагональная и недиагональная компоненты тензора ДП п/п. Учёт кубической нелинейности п/п представлен дополнительным слагаемым  $\chi |\mathbf{E}^2|$  к величине  $\varepsilon_s$ , где  $\mathbf{E}$  - амплитуда волнового поля ПП.

Решение волнового уравнения в виде поверхностной волны, локализованной на границе раздела сред  $z=0$ , с учетом нелинейности среды в области п/п ( $z > 0$ ) представим в виде:

$$E_x(z) = \begin{cases} A \operatorname{sech}[q_s(z - z_0)], & z > 0, \\ E_0 \exp(q_d z), & z < 0, \end{cases}$$

где  $E_0$  - амплитуда поля на границе раздела сред,  $A = \sqrt{2q_s^2 / \chi k_0^2}$ , параметр  $z_0$  определяет положение максимума амплитуды волнового поля в п/п:

$$z_0 = \frac{1}{q_s} \ln \left( \frac{A}{E_0} \pm \sqrt{\left( \frac{A}{E_0} \right)^2 - 1} \right).$$

Знак  $z_0$  влияет на форму распределения поля в ПВ.

Равенство тангенциальных компонент волнового поля на границе раздела сред приводит к дисперсионному соотношению

$$q_s \varepsilon_s \operatorname{th}(q_s z_0) = \beta \varepsilon_a + (\varepsilon_d / q_d) K^2,$$

где  $k_0 = \omega / c$ ,  $q_d^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_d$ ,  $q_s^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_{\perp}$ . Наличие в дисперсионном уравнении слагаемого, пропорционального первой степени константы распространения  $\beta$ , указывает на невзаимный характер режима распространения ПВ в рассматриваемой структуре. В докладе будут представлены результаты численного анализа полученных соотношений для структуры с  $\varepsilon_d = 3$ , антимонидом индия (InSb) в качестве п/п, для которого параметр нелинейности  $\chi = 0.2 \text{ см}^3/\text{эрг}$ .

## ВИЗУАЛИЗАТОР ДВУХМИКРОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ CaF<sub>2</sub>:Ho

А.А. Ляпин<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, С.Н. Ушаков<sup>1,2</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: [andrei\\_lyapin@mail.ru](mailto:andrei_lyapin@mail.ru)

Принцип работы ИК визуализаторов основывается на явление антистоксовой люминесценции. Исследованию антистоксовой люминесценции ионов Ho<sup>3+</sup> в кристаллах CaF<sub>2</sub> посвящено значительное количество работ [1-3].

В настоящей работе обсуждается возможность применения кристаллов и керамики CaF<sub>2</sub>:Ho в качестве визуализаторов двухмикронного лазерного излучения, которое имеет ряд практических применений в медицине, зондировании атмосферы, лидарах и т.д.

Также в работе представлены результаты исследования механизмов ответственных за возникновение антистоксовой люминесценции ионов Ho<sup>3+</sup> в кристаллах и керамике CaF<sub>2</sub>:Ho при возбуждении уровня <sup>5</sup>I<sub>7</sub> этих ионов двухмикронным лазерным излучением. При данном способе возбуждения в кристаллах и керамике CaF<sub>2</sub>:Ho были зарегистрированы спектры антистоксовой люминесценции ионов Ho<sup>3+</sup>, соответствующие переходам <sup>5</sup>G<sub>4</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>, <sup>5</sup>G<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>, <sup>5</sup>F<sub>3</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>, <sup>5</sup>F<sub>4</sub>(<sup>5</sup>S<sub>2</sub>)→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>, <sup>5</sup>F<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>, <sup>5</sup>S<sub>2</sub>→<sup>5</sup>I<sub>7</sub>, <sup>5</sup>I<sub>4</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>, <sup>5</sup>I<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>, <sup>5</sup>F<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>6</sub>, <sup>5</sup>F<sub>3</sub>→<sup>5</sup>I<sub>6</sub>, <sup>5</sup>I<sub>6</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>, <sup>5</sup>F<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>6</sub>, <sup>5</sup>I<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>7</sub> этих ионов.

Для выявления механизмов ответственных за возникновение антистоксовой люминесценции ионов Ho<sup>3+</sup> в материалах CaF<sub>2</sub> были зарегистрированы кинетики разгорания и затухания люминесценции ионов Ho<sup>3+</sup> с уровней <sup>5</sup>F<sub>3</sub>, <sup>5</sup>S<sub>2</sub>, <sup>5</sup>F<sub>5</sub>, <sup>5</sup>I<sub>4</sub>.

Также, для определения механизмов антистоксовой люминесценции ионов Ho<sup>3+</sup> в материалах CaF<sub>2</sub> были зарегистрированы зависимости интенсивности антистоксовой люминесценции для переходов <sup>5</sup>F<sub>3</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>, <sup>5</sup>F<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub>, <sup>5</sup>I<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>8</sub> ионов Ho<sup>3+</sup> от плотности мощности излучения возбуждения.

На основе полученных экспериментальных данных в работе предложены возможные механизмы, обеспечивающие заселение верхних энергетических уровней ионов Ho<sup>3+</sup> в кристаллах и керамике CaF<sub>2</sub> при возбуждении уровня <sup>5</sup>I<sub>7</sub> этих ионов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки РФ, З. № 3.384.2014/К .

1. M.R. Brown, W.A. Shand, Physics Letters **11**, 219 (1964).
2. M. Mujaji, J.D. Comins, Phys. Stat. Sol. C. **9**, 2372 (2004).
3. A.A. Lyapin, et al, Quantum Electronics **44** (6), 602 (2014).

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ Tm:YAP ЛАЗЕР С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

В.А. Гарюткин, Н.Г. Захаров, Е.А. Туданов, А.В. Мухин, Ю.Н. Фролов  
*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
Саров Нижегородской обл.  
E-mail: [garyutkin@gmail.com](mailto:garyutkin@gmail.com)*

Для получения генерации в области 2 мкм широко используются лазеры на кристаллах, легированных ионами  $Tm^{3+}$ . Достоинства этих лазеров определяются свойствами ионов  $Tm^{3+}$ , имеющих сильную и широкую полосу поглощения (вблизи 800 нм), идеальную для накачки мощными лазерными диодами, а также обладающих кросс-релаксационными переходами, обеспечивающими появление двух ионов на верхнем лазерном уровне на каждый поглощённый квант накачки. Одним из перспективных активных материалов для лазеров двухмикронного диапазона является Tm:YAP. Сечение усиления на длине волны генерации для Tm:YAP значительно выше, чем для Tm:YAG [1]. Кроме того, кристаллы Tm:YAP имеют высокие оптические и прочностные характеристики. Высокая эффективность Tm:YAP лазера с диодной накачкой была продемонстрирована в работе [2].

Настоящий доклад посвящен экспериментальному и расчетному исследованию твердотельного лазера с диодной накачкой на основе кристалла Tm:YAP.

В работе использовались активные элементы Tm:YAP с концентрацией ионов  $Tm^{3+}$  2 ат. %. Проведено исследование генерационных и спектральных характеристик лазера в непрерывном режиме. Для накачки лазерных кристаллов использовалась непрерывная диодная линейка (Coherent FAP-795-40C-800B) с мощностью выходного излучения до 40 Вт. Была получена эффективность преобразования излучения накачки  $\sim 41\%$ . Ширина спектра выходного излучения составляла  $\sim 5$  нм. При размещении в резонаторе селективного элемента удалось сократить ширину спектра до  $\sim 1$  нм.

Полученные экспериментальные результаты были проанализированы с использованием модели генерации с торцевой накачкой в цилиндрической геометрии. Расчет лазерных характеристик в программе основан на решении одномерных уравнений переноса излучения и уравнений для населенностей уровней. С помощью решения уравнения теплопроводности модель позволяет учитывать влияние тепловых процессов в активном элементе. Получено хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-2896.2013.2.

1. S.A. Payne et al., IEEE J. Quantum Electron. **28**, 2619, (1992)
2. A.C. Sullivan et al. OSA, 2004

ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО И СРЕДНЕГО  
ИК-ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ЗАДАЮЩИЙ  
ГЕНЕРАТОР- УСИЛИТЕЛЬ Но:YAG И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ  
ГЕНЕРАТОР СВЕТА

А.В. Мухин, С.Д. Великанов, Ю.Н. Фролов, Н.Г. Захаров, В.А. Гарюткин  
*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.*  
*E-mail: myhin-aleksei@yandex.ru*

Источники излучения ближнего и среднего инфракрасного диапазонов имеют целый ряд научных и практических применений, в том числе при мониторинге атмосферы и дистанционном зондировании утечек углеводородов из магистральных газопроводов.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований источника излучения ближнего и среднего инфракрасного диапазонов на основе системы задающий генератор-усилитель Но:YAG и параметрический генератор света (ПГС). ПГС представлял собой плоский двухзеркальный резонатор, в центре которого располагался нелинейно-оптический кристалл  $ZnGeP_2$  [1]. Источником накачки ПГС служил задающий генератор-усилитель на основе лазерного кристалла Но:YAG [2]. Задающий генератор Но:YAG работал в импульсно-периодическом режиме генерации с частотой следования импульсов 3 кГц и представлял собой двухпроходный оптический резонатор, внутри которого располагался активный кристалл и акустооптический модулятор. Выходное излучение источника излучения состояло из двух спектральных диапазонов: (3,5...5) мкм и непреобразованная часть излучения на длине волны около 2,1 мкм. Энергия излучения в обоих спектральных диапазонах на выходе системы была приблизительно одинаковой.

Получено трехкратное усиление входного сигнала в усилителе Но:YAG. Эффективность преобразования накачки в усилителе составила более 50%. Параметр распространения пучка на выходе усилителя Но:YAG составил  $M^2 \approx 1,4$ . Эффективность нелинейного преобразования в ПГС составила около 50%. Дифференциальная эффективность составила около 65%. Параметр распространения пучка ПГС составил  $M^2 \leq 5$  для длин волн (3,5...5) мкм.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-2896.2013.2.

1. G.Ghosh, Applied Optics **37** (7), (1998).
2. P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons et al. J. Opt. Soc. Am. **17**, 723-728 (2000).

# EFFICIENT UV LASING IN $\text{LiY}_{1-x}\text{Lu}_x\text{F}_4:\text{RE}$ (RE=Ce,Yb) MONOCRYSTALS

Л.А.Нуртдинова, С.Л.Кораблева, М.А.Марисов  
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань  
E-mail: nurlari@yandex.ru

We present for what we believe the first time the results of laser experiments in  $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{RE}$  ( $x=0.5..1$ , RE=Ce,Yb) monocrystals. 10-Hz 300-nm pumping with a maximal energy density of  $0.9 \text{ J/cm}^2$  lead to a 310-nm lasing with more that 20% efficiency in non-selective cavity at the room temperature. Tuning of laser wavelength in 303-332 nm spectral range was achieved in a selective cavity with output mirror  $R=80\%$ . Radiation, generated in longer-wavelength wing of the tuning curve, contained both  $\pi$ - and  $\sigma$ -polarized radiation, while cavity favored  $\pi$ -polarized lasing, seemingly due to considerably larger absorbance by color centers of  $\pi$ - rather than  $\sigma$ -polarized radiation [1]. Cooling of the active element to the temperatures about  $-100^\circ\text{C}$  as well as using of additional illumination of active element lead to a considerable variation of lasing efficiency and tuning range (see figure 1). Possible mechanisms of the observed phenomena are discussed.

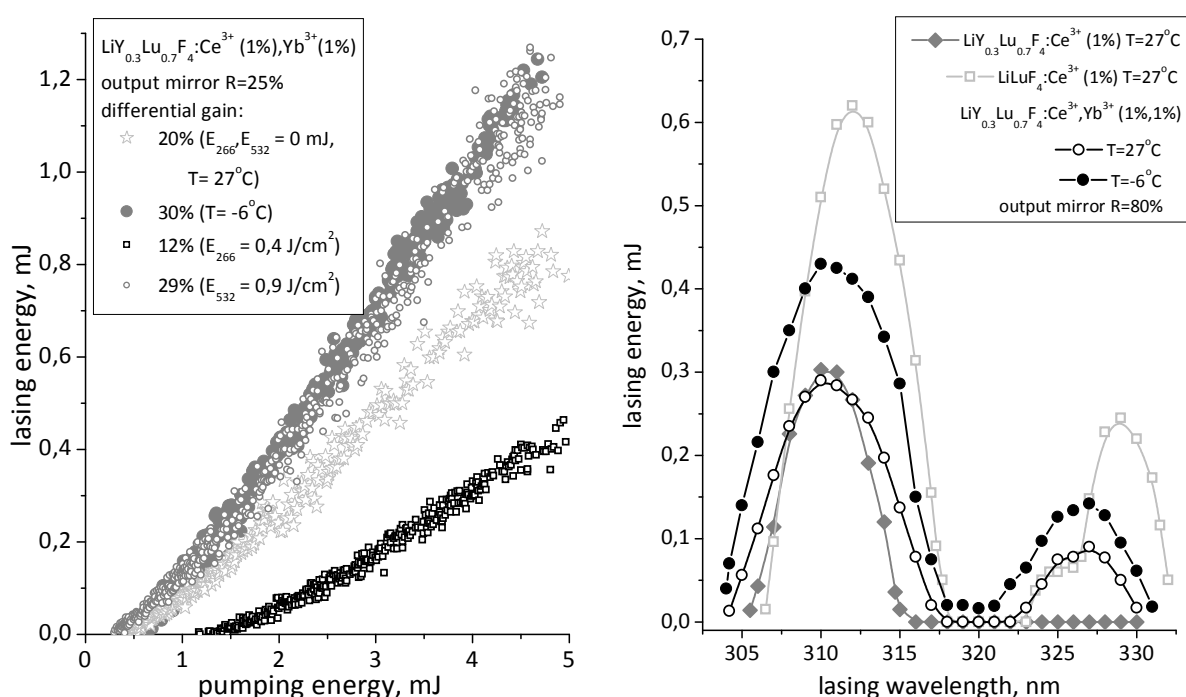


Figure 1. Laser characteristics of  $\text{LiY}_{1-x}\text{Lu}_x\text{F}_4:\text{RE}$  crystals.

The research was partially supported by RFBR, research project No. 12-03-31578\_mol\_a.

1. K.S. Lim, D.S. Hamilton, JOSA **6** (7), 1401 (1989).

## ФОТОПРОВОДИМОСТЬ И ФОТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КРИСТАЛЛАХ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ $\text{Ce}^{3+}$

В.В. Павлов, В.В. Семашко, Р.М. Рахматуллин, С.Л. Кораблева  
*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*  
*E-mail: [Vitaly.V.Pavlov@gmail.com](mailto:Vitaly.V.Pavlov@gmail.com)*

Оптические свойства большинства твердотельных активных сред ультрафиолетового (УФ) диапазона деградируют в результате воздействия интенсивного УФ излучения накачки. Исследования [1] показали, что основной причиной такой деградации является одно- или многоступенчатая фотоионизация примесных ионов и сопровождающие ее разнообразные фотодинамические процессы: фотопроводимость, процессы миграции и рекомбинации свободных носителей заряда в энергетических зонах материалов, образование и деструкция центров окраски различной природы, изменение валентных состояний примесных ионов и т.п.

Целью настоящей работы является исследование характеристик фотопроводимости в широкозонных диэлектрических кристаллах  $\text{CaF}_2:\text{Ce}^{3+}, \text{Yb}^{2+}$ ;  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$ ;  $\text{LaF}_3:\text{Ce}^{3+}$ ;  $\text{CeF}_3$ ,  $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) и  $\text{SrAlF}_5:\text{Ce}^{3+}, \text{Yb}^{3+/2+}$  при воздействии на них интенсивным УФ излучением резонансным 4f-5d переходами ионов  $\text{Ce}^{3+}$ .

В качестве основного метода исследования использовался бесконтактный СВЧ-резонаторный метод, позволяющий изучать изменения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости кристаллов при внешнем (в том числе оптическом) воздействии [2]. При этом изменения мнимой части диэлектрической проницаемости исследуемых кристаллов при экспозиции оптическим излучением обусловлены явлением фотопроводимости, а изменения ее действительной части связаны с фотодиэлектрическим эффектом, обусловленным поляризацией диэлектрика под действием электромагнитного излучения. Данная методика позволяет реализовать наносекундное временное разрешение и получать сведения о кинетике процессов с участием носителей заряда.

В работе приводятся результаты исследований временных, энергетических и спектральных зависимостей изменения комплексной диэлектрической проницаемости исследуемых кристаллов при интенсивном лазерном воздействии в диапазоне длин волн 240 – 310 нм. Обсуждается природа и механизмы наблюдаемых эффектов, а также влияние на них химического состава образцов.

1. В.В. Семашко, ФТТ **47**, 1507 (2005).
2. V.V. Pavlov, V.V. Semashko et al., JETP Letters **97** (1), (2013).

## НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ SBN:61, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Cr, Co, Ni И Ce

Г.В. Шилова, П.Г. Зверев, Л.И. Ивлева, П.А. Лыков  
*Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва*  
*E-mail: shilova@lst.gpi.ru*

Твердые растворы  $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$  (SBN:61) характеризуются сильными нелинейно-оптическими параметрами, обладают высокими значениями диэлектрической проницаемости, высокими пиро-, пьезо- и электрооптическими коэффициентами. Кристаллы SBN:61 могут рассматриваться в качестве перспективного материала для создания удвоителей частоты. Легирование SBN:61 ионами редкоземельных и переходных металлов приводит к появлению примесных дефектов в кристаллах, изменению их фазового состояния, приводящего к изменению оптических и нелинейных характеристик.

Целью настоящей работы являлось исследование зависимости квадратичной нелинейной восприимчивости ( $\chi$ ) в кристаллах SBN:61, легированных примесями ионов Cr (0,002 ÷ 0,01 вес.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), Co (0,002 ÷ 0,01 вес.%  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ), Ni (0,01 ÷ 0,5 вес.%  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ) и Ce (0,002 ÷ 0,1 вес.%  $\text{CeO}_2$ ), методом генерации второй гармоники (ГВГ). В кристаллах SBN:61 не выполняются условия фазового синхронизма, поэтому использовались порошки кристаллов с размером зерен порядка длины когерентности. Подробности экспериментальной установки и метода исследований рассмотрены в работе [1].

Были получены экспериментальные зависимости интенсивности ГВГ для порошков кристаллов SBN:61, легированных Cr, Ni и Ce. При увеличении концентрации примесных ионов наблюдалось уменьшение интенсивности ГВГ, что свидетельствовало об уменьшении  $\chi$ . Для SBN:61 с примесью Co наблюдалось аномальное увеличение  $\chi$  по сравнению с чистым SBN:61.

Полученные зависимости обсуждаются с точки зрения изменения структуры кристаллов SBN:61 и их фазового состояния при введении примесей. Зависимость величины квадратичной нелинейной восприимчивости в SBN:61 от концентрации примеси может быть использована для изготовления нелинейных оптических элементов для ГВГ с эффективностью преобразования, контролируемой примесным составом кристалла.

1. Г.В. Шилова, П.Г. Зверев, Л.И. Ивлева, Вестник Мордовского Университета, серия ест. и техн. науки **1-2**, 43-49 (2014).



## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОКРОВНОГО СЛОЯ GaAs НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InAs

Е.В. Уцына<sup>1</sup>, Н.С. Волкова<sup>1</sup>, А.П. Горшков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,  
Нижний Новгород  
E-mail: [eucyna@bk.ru](mailto:eucyna@bk.ru)

Перспективы применения структур с квантовыми точками (КТ) InAs в матрице GaAs обусловлены возможностью получения в них оптического излучения в широком диапазоне длин волн от 1 до 1.8 мкм. Энергия основного перехода в КТ, а, следовательно, длина волны излучения зависит от размера, состава, формы и упругих напряжений, возникающих из-за рассогласования параметров постоянных решеток InAs и GaAs. Таким образом, актуальной задачей является построение модели КТ, адекватно описывающей их оптоэлектронные свойства.

Ранее было экспериментально установлено [1], что изменение толщины покровного слоя приводит к изменению энергии основного перехода в КТ. В [1] показано, что в КТ, выращенных газофазной эпитаксией из металлоорганических соединений при атмосферном давлении, увеличение толщины покровного слоя от 0 до 30 нм приводит к голубому сдвигу энергии основного перехода на 250 мэВ.

В данной работе, используя программное обеспечение nextnano<sup>++</sup> [2], изучалось влияние толщины и геометрии внешнего покровного слоя GaAs на энергетический спектр КТ InAs. При расчетах структур с КТ с размером основания 22 нм и высотой 9 нм использовались следующие модели:

- КТ, закрытые ровным покровным слоем,
- КТ, закрытые неровным покровным слоем, состоящим из прямоугольного параллелепипеда и эллипсоида вращения.

Первая модель хорошо описывает структуры с толстым покровным слоем толщиной ~ 30 нм, а вторая - с тонким покровным слоем ~ 5 нм.

При рассмотрении поверхностных КТ таких же размеров получается заниженная по сравнению с экспериментальными результатами [1] энергия основного перехода. Следовательно, необходимо рассматривать более мелкие по размерам КТ. Это предположение согласуется с тем фактом, что на воздухе происходит окисление структуры.

1. I.A. Karpovich, B.N. Zvonkov, N.V. Baidus' et al. *Trends in Nanotechnology Research* ed. By Eugene V. Dirote. New York: Nova Science Publisher, 2004. pp. 173-208.
2. [Электронный ресурс] [http://www.nextnano.de/nextnano<sup>++</sup>](http://www.nextnano.de/nextnano++).

# ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРА НА РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАССИВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОСТРОВКОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ

В.В. Грибко, В.Н. Трушин, А.С. Маркелов  
*Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
E-mail: [redfox-92@mail.ru](mailto:redfox-92@mail.ru)*

Известно, что пространственное распределение интенсивности в дифрагированном рентгеновском пучке можно вызвать локальным рассогласованием областей дифрагирующего объема из отражающего положения. Рассогласование можно достичь как локальными изменениями параметров решетки кристалла, так и разориентировкой частей его поверхности относительно брэгговского положения. В этих случаях задача может быть решена неоднородным тепловым воздействием на дифрагирующий кристалл [1]. Недостатком данного способа является низкая разрешающая способность, которая в значительной степени определяется теплопроводностью кристалла.

В данной работе представлены экспериментальные результаты и данные расчетов по исследованию влияния теплового воздействия лазера на рентгенодифракционные параметры массива монокристаллических островков (МО) с целью изучения возможности формирования неоднородных рентгеновских пучков с высоким разрешением.

В качестве исследуемых образцов нами использовались 3 массива МО, сформированные на основе кристалла GaAs и Si. На примере МО GaAs экспериментально показано, что при воздействии на массив лазерным пучком  $\lambda=532$  нм величина максимальных смещений кривой качания (КК) более чем на 2 порядка превышает расчетное смещение.

В работе делается вывод, что основное смещение КК вызвано неоднородной деформацией подложки МО, в качестве которой использовался силиконовый герметик большим КТР. Неоднородная деформация подложки, вероятно, обусловлена разностью температур между частями ее поверхности находящихся в промежутках МО и под ними. Это связано с тем, что МО экранируют воздействие лазерного пучка на подложку. В этом случае подложка может играть роль теплового актуатора, который изменяет угол наклона МО в зависимости от мощности падающего на массив МО светового пучка.

1. В.Н.Трушин, А.С. Маркелов, Е.В. Чупрунов, Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтронные исслед. **2**, 44-48 (2007).

# ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ КРИСТАЛЛОВ ДИГИДРОФОСФАТА КАЛИЯ С ПРИМЕСЬЮ ПЕРМАНГАНАТА КАЛИЯ

М.А. Фаддеев, Д.С. Нуждин, В.А. Лыков

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [vladimir.lyko@gmail.com](mailto:vladimir.lyko@gmail.com)*

Целью настоящей работы было определение количества марганца, вошедшего в кристаллы дигидрофосфата калия (KDP)  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  при добавлении в исходный раствор перманганата калия  $\text{KMnO}_4$ .

Было выращено в отдельных колбах шесть серий кристаллов с различным содержанием марганца в питающем растворе методом температурного перепада. Из каждой серии было выбрано по три кристаллических образца для последующего анализа.

Элементный анализ выращенных кристаллов проводился методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-ОЭС). Исследуемые образцы были растворены в деионизированной воде (18,2 МОм сопротивление, 5 ppb ТОС). Анализ проводился по эмиссионным линиям марганца, не интерферирующим с линиями компонентов матрицы.

Результаты эксперимента, усредненные по образцам каждой серии, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Количество марганца, вошедшего в выращенные кристаллы.

Масса $\text{KMnO}_4$ в питающем растворе, мг	Относительное содержание марганца в образцах, $10^{-4}$
15	$0,33 \pm 0,03$
25	$0,45 \pm 0,06$
40	$0,23 \pm 0,04$
60	$0,33 \pm 0,03$
80	$0,81 \pm 0,06$
100	$0,62 \pm 0,08$

Сравнение полученных результатов с исходными данными свидетельствует, во-первых, что в процессе роста встраивается в кристаллическую структуру KDP относительно малая часть атомов марганца. Во-вторых, некоторая нерегулярность числовых значений во 2-м столбце табл.1 обусловлена случайным характером встраивания атомов марганца.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКОЛ  
МЕТОДОМ «НАКАЧКА-ЗОНДИРОВАНИЕ»

Н.А. Никулаева<sup>1</sup>, Е.А. Романова<sup>1</sup>, D. Furniss<sup>2</sup>, A.B. Seddon<sup>2</sup>, T.M. Benson<sup>2</sup>,  
S. Guizard<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,  
Саратов*

<sup>2</sup>*University of Nottingham, Nottingham, UK*

<sup>3</sup>*CNRS-Ecole Polytechnique, Palaiseau, France*

*E-mail: [per4ik64@mail.ru](mailto:per4ik64@mail.ru)*

Халькогенидные стекла представляют интерес для создания компактных нелинейных оптических устройств ближнего и среднего ИК диапазона. В данной работе представлены результаты измерений временной динамики нелинейного отклика в образцах халькогенидных стекол системы As-S-Se при облучении фемтосекундными лазерными импульсами большой интенсивности на длине волны 0.79 мкм. Для измерений использовался интерферометрический метод «накачка-зондирование», основанный на измерении разности фаз двух пробных импульсов [1], которая пропорциональна изменению показателя преломления, наведенному в образце импульсом накачки (длительность импульсов 40 фс, частота повторения 20 Гц, энергия импульса накачки до 500 мкДж). На Рис.1. показана зависимость измеренной разности фаз в зависимости от времени задержки между вторым пробным импульсом и импульсом накачки при энергиях импульса накачки 3.1 мкДж и 6 мкДж.

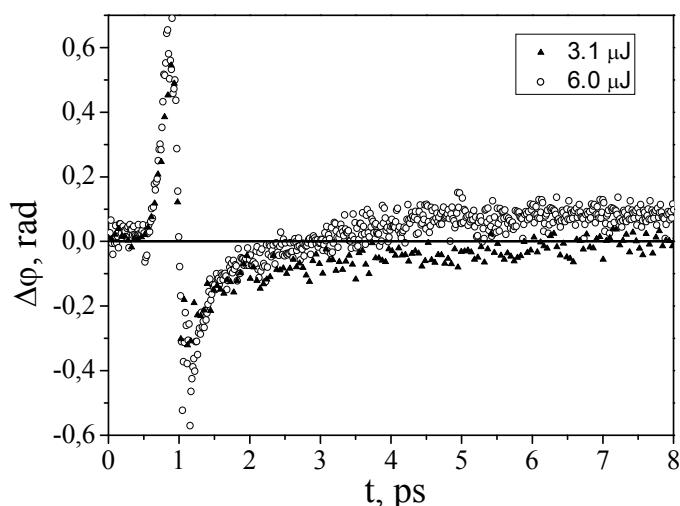


Рис. 1. Временная динамика нелинейного отклика в образце состава As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>.

Полученные результаты измерений позволили определить основные сценарии динамики нелинейного отклика в образцах различного состава и рассчитать нелинейные оптические коэффициенты преломления и поглощения на длине волны 0.79 мкм.

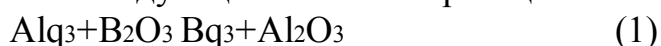
1. Martin P., et al., Phys. Rev.B. **55**, 5799 (1997).

## ЛАЗЕРНОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПЛЕНОК ГИБРИДНЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р.Р. Сайфутяров, А.В. Хомяков, А.А. Аккузина, Р.И. Аветисов,  
О.Б. Петрова, И.Х. Аветисов

*Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева,  
Москва E-mail: aich@rctu.ru*

Наноразмерные пленки органических электролюминофоров решают важную задачу по созданию новых высокоэффективных светоизлучающих устройств (OLED). Три-(8-оксихинолят) алюминия (Alq<sub>3</sub>) был первым соединением, при помощи которого продемонстрировали эффективную органическую электролюминесценцию зеленого цвета свечения. На данный момент это соединение используется для создания как светоизлучающих, так и электронно-транспортных слоев OLED [1]. При создании гибридных материалов на основе органических люминофоров в стеклянной матрице, было замечено, что при высоких температурах происходит изменение спектра люминесценции [2]. Предполагалось, что это связано с протеканием следующей обменной реакции



Методом вакуумного термического напыления на стеклянную подложку с прозрачным проводящим слоем ИТО формировали послойную структуру: 50 нм V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/50 нм Alq<sub>3</sub>/100 нм Al. С помощью диодного лазера (785 нм) с диаметром пятна в фокусе 0,1 мм (20-150 Вт/см<sup>2</sup>) со стороны подложки создавали локальный нагрев внутри многослойной структуры. В результате контролируемого проведения реакции (1) мы формировали структуры с неоднородной контролируемой фотолюминесценцией (рис.1).

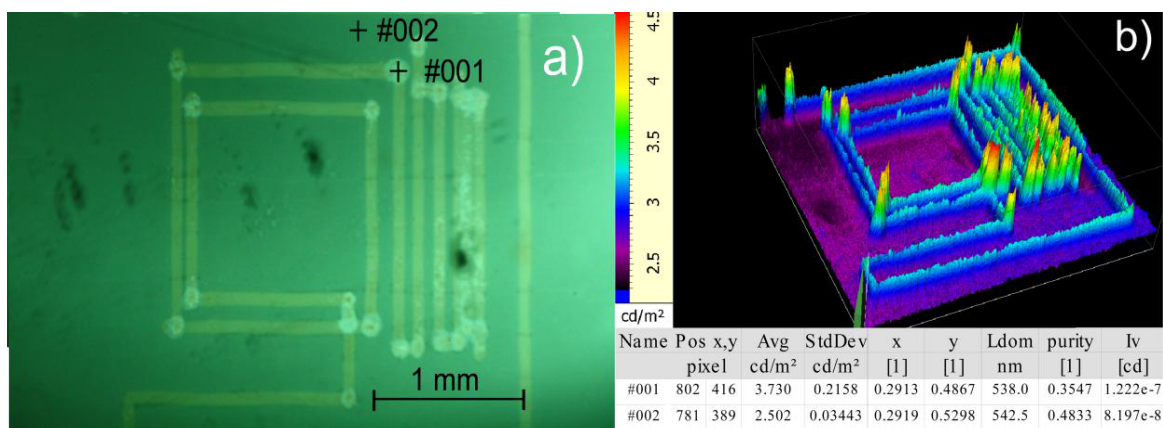


Рис. 1. Фотолюминесценция ( $\lambda_{\text{ext}}=365$  нм при 293 К) гибридной структуры (50 нм V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/50 нм Alq<sub>3</sub>/100 нм Al) с областями воздействия лазера (линии), а) микрофотография; б) интенсивность фотолюминесценции.

1. S. Franky, *Organic Electronics: Materials, Processing, Devices and Applications*, Ed., Boca Raton: Taylor, 2010.
2. R. I. Avetisov, O. B. Petrova, A. Khomyakov, et al., *J.Cryst.Growth* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.02.018>

## ВЫРАЩИВАНИЕ И СТРУКТУРА КРИСТАЛЛА $\text{Ca}_{0.94}\text{Sn}_{0.06}\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

М.Л. Лабутина, Д.С. Нуждин, Н.В. Сомов, Е.С. Старостина  
*Нижегородский государственный университет*  
*им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*  
*E-mail: [starostina2012e@yandex.ru](mailto:starostina2012e@yandex.ru)*

Одной из важных задач современной физической кристаллографии является установление связи между атомной структурой кристалла, элементным, химическим составом и макроскопическими физическими свойствами кристалла [1]. В данной работе методом кристаллизации в геле были выращены и исследованы нелинейно-оптические смешанные кристаллы тартрата кальций-олово. Синтез кристаллов осуществлялся в метасиликатном геле на основе винной кислоты в условиях термостатирования при температуре  $34(1)^\circ\text{C}$  [2]. Для получения смешанных кристаллов тартрата кальций-олово в качестве питающих растворов были взяты водные растворы  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  с молярным соотношением 1:1. Выращенные кристаллы тартрата кальций-олово бесцветны, прозрачны, размеры от 1 мм до 6 мм.

Элементный анализ проводился на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой VARIAN (AGILENT) 720-ES. По результатам измерений было определено, что олово в полученных кристаллах содержится в количестве  $x_{\text{Sn}}=6.2(12)\%$  ат.

Рентгеноструктурные исследования полученных кристаллов проводились на автоматическом монокристалльном дифрактометре Oxford Diffraction Gemini S, на  $\text{MoK}_\alpha$  излучении. Установлено, что атомная структура выращенного кристалла  $\text{Ca}_{0.94}\text{Sn}_{0.06}\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  описывается пространственной группой симметрии  $\text{P}2_12_12_1$ . Элементарная ячейка содержит четыре формульных единицы. Кристалл  $\text{Ca}_{0.94}\text{Sn}_{0.06}\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  имеет трехмерную каркасную структуру. Катионная позиция в кристалле тартрата кальций-олово является смешанной и соответственно заселена ионами кальция ( $x_{\text{Ca}}=94(1)\%$  ат.) и олова ( $x_{\text{Sn}}=6(1)\%$  ат.), что согласуется с результатами элементного анализа. В атомной структуре кристалла  $\text{Ca}_{0.94}\text{Sn}_{0.06}\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ионы металла координированы восемью атомами кислорода, два из которых являются молекулам воды, одна - OH группа и пять - карбоксильных групп. На одну формульную единицу приходится две сольватные молекулы воды. Расстояние металл-кислород лежит в диапазоне  $2.3719(12)$ - $2.5367(11)$  Å, что соответствует ранее полученным результатам [3].

1. И.Р. Шен, *Принципы нелинейной оптики*. М.: Наука, 1989.
2. Г. Гениш, *Выращивание кристаллов в гелях*. М.: Мир, 1973.
3. F.C. Hawthorne, I. Borys, R.B. Ferguson, *Acta Crystallogr., Sect. B: Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* **38**, 2461 (1982).

## ОПТИКО-ЭМИССИОННЫЙ ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ РЯДА КРИСТАЛЛОВ $\text{KTi}_{1-x}\text{Hf}_x\text{OPO}_4$

Д.С. Нуждин, Д.В. Симановский, В.А. Иванов, М.А. Фаддеев  
*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород  
E-mail: [d.s.nuzhdin@ya.ru](mailto:d.s.nuzhdin@ya.ru)*

Для выращивания кристаллов  $\text{KTi}_{1-x}\text{Hf}_x\text{OPO}_4$  (КТР:Hf) нами использовалась одна из разновидностей раствор-расплавного метода: метод спонтанной кристаллизации. Согласно экспериментальным данным, представленным в работах по выращиванию кристаллов КТР методом из раствора в расплаве (flux) при добавлении  $\text{WO}_3$  [1, 2], эффективно выращивание кристаллов происходит при следующем соотношении компонент в реакции: 42%  $\text{K}_2\text{O}$ , 14%  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 14%  $\text{TiO}_2$ , 30%  $\text{WO}_3$ , которое было взято за основу. Вносимое количество оксида гафния замещало соответствующую часть оксида титана.

Выращивание проводилось в платиновом тигле, имевшем форму цилиндра высотой 20 мм и диаметром основания 20 мм. По окончании процесса выращивания получившиеся кристаллы очищались от осевших на них не закристаллизовавшихся остатков раствор-расплава. Нами был выращен ряд кристаллов  $\text{KTi}_{1-x}\text{Hf}_x\text{OPO}_4$  из шихты со значениями  $x$  содержания гафния в шихте в интервале от 0.01 до 0.1.

Для определения количества гафния в выращенных образцах был использован метод ИСП-АЭС. Благодаря высокой чувствительности и доступным возможностям преодоления матричных помех, ИСП-АЭС является удобным решением для определения примесей в кристаллах семейства КТР. Анализ проводился на спектрометре VARIAN 720-ES с аксиальным обзором плазмы. Было проведено исследование спектра и определены аналитические линии титана и гафния. Для аналитических линий были рассчитаны пределы обнаружения.

В связи с химической стойкостью кристаллов титанил-фосфата калия, их необходимо растворять определенным образом, нагревая в смеси серной и плавиковой кислот [3].

1. K.Iliev et al., J. of Crystal Growth **100** (1–2), 225–232 (1990).
2. D.P. Shumov et al. Cryst. Res. Tech. **25** (11), 1245-1250 (1990).
3. N. Daskalova et al. , Spectrochimica Acta Part B **52**, 257-278 (1997.)

# ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ЗАСЕЛЕНИЯ И РАСПАДА ВОЗБУЖДЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ

Б.Н. Казаков, А.В. Ловчев, В.В. Павлов

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

E-mail: [Vitaly.V.Pavlov@gmail.com](mailto:Vitaly.V.Pavlov@gmail.com)

В данной работе предложена методика оценки условий для создания устойчивого состояния динамического равновесия между процессами заселения и распада возбужденных энергетических уровней. Изучена кинетика люминесценции ионов  $Tm^{3+}$  в системе  $YF_3:Yb^{3+}(20\%),Tm^{3+}(1\%)$  при импульсном возбуждении в область собственного поглощения ионов  $Yb^{3+}$  инфракрасным лазерным диодом ( $\lambda_{\text{возб}} = 926 \div 980$  нм). В отличие от авторов [1,2], которые изучали эту систему для определения механизма возбуждения ионов  $Tm^{3+}$  через ионы  $Yb^{3+}$ , применяя наносекундные импульсы возбуждения, мы использовали импульсы длительностью  $t_{\text{возб}} = 0,1 \div 14$  мс. Получены серии кинетических зависимостей интенсивностей люминесценции для различных значений частоты модуляции  $f_{\text{мод}}$ , длительности импульса, плотности  $\rho$  энергии и длины волны возбуждающего излучения при 300 К. Анализ результатов представлен на рис. 1. Видно, что при высокой плотности энергии возбуждения и длительности импульса  $t_{\text{возб}} = 3 \div 14$  мс в кинетических зависимостях люминесценции кристалла  $YF_3:Yb^{3+}(20\%),Tm^{3+}(1\%)$  (переход  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$ ,  $\lambda_{\text{люм}} = 479$  нм) наблюдаются горизонтальные участки. Они соответствуют устойчивому состоянию динамического равновесия между процессами заселения и распада возбужденного энергетического уровня ионов  $Tm^{3+}$ . Аналогичные состояния наблюдаются также в кинетике люминесценции с других возбужденных энергетических уровней  ${}^1D_2$  и  ${}^3H_4$  ионов  $Tm^{3+}$  при 300 К.

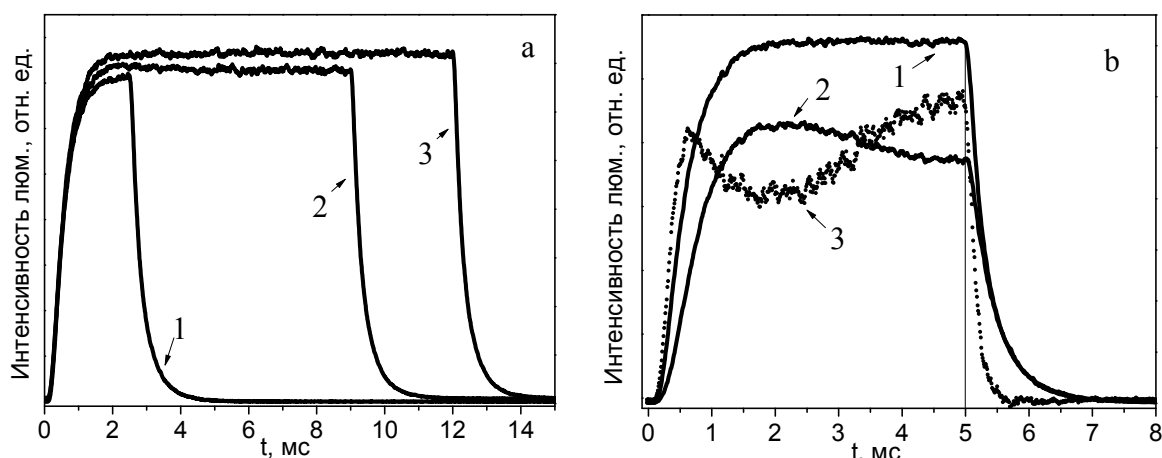


Рис. 1. Кинетика люминесценции кристалла  $YF_3:Yb^{3+}(20\%),Tm^{3+}(1\%)$ ;  $f_{\text{мод}} = 66,7$  Гц;  $\lambda_{\text{возб}} = 980$  нм;  $\lambda_{\text{люм}} = 479$  нм: а)  $t_{\text{возб}} = 2,5$  мс (1); 9 мс (2); 12 мс (3); б) интенсивности люминесценции  $I_{p1}$  (1);  $I_{p2}$  (2); и их разность ( $I_{p1} - I_{p2}$ ) (3),  $\rho_1 > \rho_2$ ;  $t_{\text{возб}} = 5$  мс.

1. Huang Qing-Ming, Chinese J. Struct. Chem. **29**, 993 (2010).
2. Chunyan Cao et al, J. Nanosci. Nanotechnol. **10**, 1900 (2010).



# СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $\text{Li}(\text{YLu})\text{F}_4:\text{Pr}$

Е.В. Глушкин<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, В.В. Семашко<sup>2</sup>, С.Л. Кораблева<sup>2</sup>,  
С.Н. Ушаков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск*

<sup>2</sup>*Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань*

<sup>3</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

*E-mail: Deafs@mail.ru*

Кристаллы и стекла, активированные ионами  $\text{Pr}^{3+}$ , с одной стороны привлекают интерес исследователей особенностями спектроскопических характеристик данного иона, с другой стороны данные материалы могут выступать в качестве перспективных лазерных материалов видимого диапазона спектра.

Разработка коммерческих лазерных диодов, генерирующих излучение в синей области спектра с выходной мощностью от 1 Вт до 25 Вт, стимулирует их использование в качестве источников накачки при создании твердотельных лазеров видимого диапазона спектра. В качестве активных сред таких лазеров могут выступать кристаллы с общей формулой  $\text{LiMF}_4$  (где  $\text{M}=\text{Y}, \text{Lu}$ ), активированные ионами  $\text{Pr}^{3+}$ .

О получении лазерной генерации в видимом диапазоне спектра на переходах  $^3\text{P}_0-^3\text{F}_2$ ,  $^3\text{P}_1-^3\text{H}_5$  в кристаллах  $\text{LiYF}_4:\text{Pr}$  при полупроводниковой накачке сообщается в работах [1-3].

В настоящей работе представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик кристаллов  $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}$  и выполнен их сравнительный анализ с аналогичными характеристиками в кристаллах  $\text{LiYF}_4:\text{Pr}$  и  $\text{LiLuF}_4:\text{Pr}$ .

В докладе представлены результаты генерационного эксперимента на кристаллах  $\text{LiLuF}_4:\text{Pr}$  в условиях лазерной накачки с длиной волны излучения 457 нм.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ. ГЗ 3.384 (2014).

1. A. Richter, E. Neumann, E. Osias et al., Opt. lett. **29**, 2638-2640 (2004).
2. Junichiro Kojou, Yojiro Watanabe, Priyanka Agrawal et al., Optics Communications **290**, 136-140 (2013).
3. T. Gun, P. Metz, and G. Huber, Appl. Phys. Lett. **99**, 181103 (2011).

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ЛАНГАСИТА

В.Г. Иванова<sup>1</sup>, Г.В. Шилова<sup>2</sup>, П.Г. Зверев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: [zverev@lst.gpi.ru](mailto:zverev@lst.gpi.ru)

Кристалл лангасита (ЛГС,  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ) является известным пьезоэлектрическим и лазерным материалом. Он обладает высокими пьезо-, акусто- и электрооптическими характеристиками. В 1983 г. он был впервые предложен в качестве матрицы для создания лазерно-активных сред [1]. Современные технологии роста позволяют получать кристаллы ЛГС большого размера и высокого оптического качества, изготавливать на их основе нелинейно-оптические элементы.

Кристаллическая структура лангасита принадлежит к тригональной системе, пространственная группа  $P321$ . Кристалл ЛГС нецентросимметричный, поэтому в нем может наблюдаться генерация второй гармоники, генерация суммарной и разностной частоты. Активированные кристаллы ЛГС можно использовать для создания лазеров с нелинейным преобразованием частоты в самой лазерной среде. Целью настоящей работы было исследовать диапазон оптической прозрачности кристалла ЛГС, определить ширину запрещенной зоны и измерить квадратичную нелинейную восприимчивость в нем.

Экспериментальные образцы монокристаллов ЛГС были выращены и изготовлены в компании «Фомос-Материалс». Область прозрачности ЛГС простирается от 250 нм до 5 мкм. Для определения ширины запрещенной зоны в ЛГС проводились измерения спектра поглощения в пластинке кристалла ЛГС толщиной 200 мкм в ближней УФ области при комнатной и азотной температурах. С помощью правила Урбаха [2] была определена ширина запрещенной зоны  $E_g$ , равная 6,3 эВ, что хорошо согласуется с литературными данными, полученными другими методами.

Отсутствие центра симметрии в кристаллах ЛГС позволяет их использовать для генерации второй гармоники (ГВГ). Из-за малого двулучепреломления в кристалле ЛГС отсутствует направление синхронизма для ГВГ в видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах. Для исследования ГВГ лазерного излучения с длиной волны 1,064 мкм использовался метод ГВГ в порошках кристалла [3]. Экспериментально измененная эффективная величина квадратичной нелинейной восприимчивости в ЛГС составила  $2,6 \cdot 10^{-12}$  м/В, что почти на порядок выше, чем в кристалле кварца.

1. A.A. Kaminskii, B.V. Mill, G.G. Khodzhabagyan, et al. Phys. Stat. Sol. A **80**, 387 (1983).
2. F. Urbach, Phys. Rev. **92**, 1324 (1953).
3. Г.В. Шилова, П.Г. Зверев, Л.И. Ивлева, Вестник Мордовского университета, сер. «Ест. и техн. науки» **1-2**, 43 (2014).

# **ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ**

# ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ

С.А. Тарасенко

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*

*E-mail: [tarasenko@coherent.ioffe.ru](mailto:tarasenko@coherent.ioffe.ru)*

На поверхности кристалла или гетерогранице могут возникать локализованные состояния, обусловленные нарушением периодического потенциала. Наличие таких состояний, теоретически предсказанных И.Е. Таммом [1] и обнаруженных в различных системах, обычно определяется структурой поверхности. Существует, однако, особый класс диэлектрических трехмерных (и двумерных) кристаллов, имеющих устойчивые к возмущениям проводящие поверхностные (краевые) состояния. Такие материалы получили название топологических изоляторов [2].

Физика топологических изоляторов переживает в настоящий момент период становления и бурного развития. Такое внимание связано как с фундаментальным интересом к физике поверхности, играющей ключевую роль в наноструктурах, так и с перспективой создания новых материалов и приборов на их основе для электронных и оптоэлектронных применений. Поверхностные и краевые состояния, устойчивые к внешним воздействиям, дефектам и неоднородностям границы, формируются в материалах, в которых диэлектрическая щель в зонной структуре обусловлена спин-орбитальным взаимодействием. Согласно современным представлениям трехмерными топологическими изоляторами являются кристаллы селенидов и теллуридов висмута и сурьмы [3,4], напряженные слои HgTe [5,6], двумерными – квантовые ямы HgTe/CdHgTe [7,8] и InAs/GaSb [9] определенной толщины, двумерные гексагональные кристаллы кремния и германия (силицен и германен) [10]. Топологические изоляторы обладают киральными поверхностными или краевыми состояниями, в которых направления спина и импульса строго коррелированы, что приводит к возникновению новых электродинамических эффектов. В докладе представлены обзор электронных свойств топологических изоляторов, а также результаты наших исследований фотогальванических эффектов в таких системах.

1. I. Tamm, Phys. Z. Soviet Union **1**, 733 (1932).
2. M.Z. Hasan and C.L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).
3. H. Zhang et al., Nature Phys. **5**, 438 (2009).
4. Y. Xia et al., Nature Phys. **5**, 398 (2009).
5. L. Fu and C. L. Kane, Phys. Rev. B **76**, 045302 (2007).
6. C. Büne et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 126803 (2011).
7. B.A. Bernevig et al., Science **314**, 1757 (2006).
8. M. König et al., Science **318**, 766 (2007).
9. I. Knez et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 026602 (2014).
10. Ch. Liu et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 076802 (2011).

## РЕЗОНАНСНОЕ И НЕРЕЗОНАНСНОЕ КОСВЕННОЕ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Н.С. Аверкиев<sup>1</sup>, И.В. Крайнов<sup>1</sup>, И.В. Рожанский<sup>1,2</sup>, E. Lähderanta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland*

*E-mail: [averkiev@les.ioffe.ru](mailto:averkiev@les.ioffe.ru)*

Обменное взаимодействие — взаимодействие тождественных частиц в квантовой механике, приводящее к зависимости значения энергии системы частиц от её полного спина. Этот чисто квантовый эффект приводит к добавке к энергии системы взаимодействующих частиц, обусловленной перекрытием волновых функций при ненулевом значении полного спина. В случае непосредственного перекрытия двух волновых функций говорят о прямом обмене, а в случае присутствия частицы-посредника, через которую происходит взаимодействие, говорят о косвенном обмене. Обменное взаимодействие ответственно за явление ферромагнетизма, причем можно показать, что для теории ферромагнетизма ключевую роль играет парное взаимодействие. Прямое обменное взаимодействие экспоненциально затухает с увеличением расстояния между магнитными моментами, поэтому для разбавленных магнитных полупроводников наиболее важную роль играет косвенное обменное взаимодействие, спадающее степенным образом [1].

В докладе исследуется косвенное обменное взаимодействие между двумя парамагнитными ионами за счёт электронного или дырочного газа. Стандартным методом для расчета косвенного обмена является теория РККИ [2], предсказывающая осциллирующий характер косвенного обменного взаимодействия в зависимости от расстояния. Теория РККИ, будучи теорией возмущений, однако, неприменима в случае сильного взаимодействия. Построение точного решения является сложной многочастичной задачей, требующей учёта спиновой динамики ионов.

Существует, однако, практически важный случай, когда спиновая динамика ионов несущественна, но решение требует выхода за рамки теории возмущений. Примером такой системы является дельта-слой марганца, расположенный на небольшом расстоянии от квантовой ямы (КЯ) в гетероструктуре на основе InGaAs [3]. Локализирующий потенциал парамагнитного иона создаёт связанное состояние, при этом туннелирование между таким состоянием и сплошным спектром носителей в КЯ может иметь резонансный характер. Учет этого явления в задаче косвенного обмена не может быть произведен в рамках теории РККИ в силу значительной перестройки волновых функций при резонансном туннелировании. Нами предложена теория для корректного учёта косвенного обмена в этом случае, поскольку можно пренебречь спиновой динамикой ионов в силу малости туннельного параметра. Расчет энергии взаимодействия производится точно, с использованием теории Фано-Андерсона [4], описывающей гибридизацию локализованного состояния с

континуумом. Обнаружено, что в резонансном случае, когда энергия локализованного состояния носителя заряда на парамагнитной примеси лежит в диапазоне энергий континуума делокализованных состояний электронного газа, имеет место значительное резонансное усиление косвенного обменного взаимодействия [5].

Показано, что для квантовой ямы на основе InGaAs с дельта-слоем марганца эффект резонансного косвенного обмена приводит к немонотонной зависимости температуры Кюри от глубины квантовой ямы, что наблюдалось в эксперименте [3].

1. S. Blundell, *Magnetism in Condensed Matter*, Oxford University Press (2012).
2. M.A. Ruderman, C. Kittel, Phys. Rev. **96**, 99 (1954).
3. B. Aronzon, et.al., J. Phys.: Conf. Ser. **456**, 012001 (2013).
4. U.Fano, Phys. Rev. **124**, 1866 (1961).
5. I.V. Rozhansky, I.V. Krainov, N.S. Averkiev, E. Lähderanta, Phys. Rev. B **88**, 155326 (2013).

# СПИНОВЫЕ И ЗАРЯДОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫМИ АКЦЕПТОРАМИ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaAs/AlGaAs

П.В. Петров, Ю.Л. Иванов, Н.С. Аверкиев

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*

*E-mail: [pavel.petrov@gmail.com](mailto:pavel.petrov@gmail.com)*

Положительно заряженные акцепторы ( $A^+$  центры) являются твёрдотельным аналогом отрицательно заряженного атома водорода  $H^-$ . Уже почти сто лет известно, что нейтральный атом водорода способен захватить ещё один электрон с образованием иона  $H^-$  [1]. Подобные трёхчастичные состояния существуют и в твёрдом теле. Нейтральные доноры и акцепторы могут захватывать дополнительные электроны и дырки, образуя  $D^-$  и  $A^+$  центры. Делокализованными твёрдотельными аналогами иона  $H^-$  являются  $X^+$  и  $X^-$  трионы. Изолированный  $A^+$  центр представляет собой одиночное заполненное состояние в верхней зоне Хаббарда. Поэтому изучение его свойств важно для понимания такой фундаментальной проблемы как переход металл-изолятор в легированных полупроводниках. В квантовых ямах возможно получение термодинамически стабильных  $A^+$  центров посредством одновременного легирования акцепторами в яме и в барьерах. Свойства такой системы главным образом определяются совокупностью обменного взаимодействия двух дырок, локализованных на  $A^+$  центре, и кулоновского взаимодействия заряженных центров между собой. На протяжении последних 10 лет структуры с  $A^+$  центрами на основе системы GaAs/AlGaAs изучались как оптическими [2-4], так и транспортными [5-7] методами.

В работе [1] посредством измерения циркулярно поляризованной фотолюминесценции в магнитном поле было показано, что основное состояние изолированного  $A^+$  центра имеет проекцию  $J_z = 0$  на ось размерного квантования. Как было показано в [8], в результате обменного взаимодействия моменты двух дырок выстраиваются таким образом, что основным состоянием является состояние с полным моментом  $J=2$ . Однако, в квантовых ямах наличие оси размерного квантования приводит к расщеплению его на два: возбужденное  $J_z = \pm 1, \pm 2$  и основное  $J_z = 0$ . Основное состояние  $J_z = 0$  не изменяет свою энергию в магнитном поле, однако, остающийся после рекомбинации электрона на  $A^+$  центр, нейтральный акцептор расщеплён магнитным полем. Это приводит к тому, что в спектре поляризованной фотолюминесценции наблюдается нулевая поляризация и ненулевое расщепление Зеемана рекомбинационной линии.

Позже, в работе [7] экспериментально было обнаружено, что магнетосопротивление системы с  $A^+$  центрами в квантовых ямах медленно релаксирует после изменения внешних условий. Данное явление объяснялось именно тем, что  $A_0$  и  $A^+$  центры имеют различные спиновые

состояния. Наличие кулоновского взаимодействия в системе неупорядоченных локализованных зарядов приводит к образованию кулоновского стекла. Магнитное поле в разной степени изменяет энергию состояний с различной спиновой структурой, что и приводит к медленной перезарядке кулоновского стекла.

Обнаруженный в работе [6] посредством транспортных измерений переход слабая-сильная локализация позднее был изучен нами по сдвигам линий фотолюминесценции в магнитном поле [3]. Хорошо известно, что локализация рекомбинирующих носителей заряда проявляется в магнетолюминесценции как линейный сдвиг Ландау для свободных носителей, и как квадратичный по полю сдвиг для локализованных. При этом из параметров этого энергетического сдвига можно получить информацию об эффективных массах дырок и электронов, а так же о радиусе локализации. Используя эту методику нам удалось показать, что увеличение концентрации  $A^+$  центров в квантовых ямах приводит к перекрытию состояний в верхней зоне Хаббарда, частичной экранировке кулоновских флуктуаций, и как следствие к делокализации рекомбинирующих носителей.

Хорошо известно, что в системе локализованных зарядов при низких температурах в плотности состояний возникает минимум. Это явление возникает вследствие электростатического взаимодействия зарядов и называется кулоновской щелью. Наличие кулоновской щели в плотности состояний  $A^+$  центров в квантовых ямах детектировалось при помощи транспортных измерений [5]. Проведённые нами исследования спектров фотовозбуждения в таких системах свидетельствуют о возможности детектирования кулоновской щели и оптическими методами [4].

Всё вышесказанное позволяет утверждать, что с помощью оптических и транспортных экспериментальных методик получена согласованная физическая картина, в которой одна и та же модель позволяет качественно описать все имеющиеся экспериментальные результаты.

Работа поддержана грантами НШ-347.2014.2 и РФФИ 12-02-00826-а.

1. H. Bethe, *Zeitschrift fur Physik* **57**(11-12), 815-821 (1929).
2. P.V. Petrov et al., *Physica B: Condensed Matter*, **404**, 5148 (2009).
3. П.В. Петров et al., *ФТП* **45**, 794 (2011).
4. P.V. Petrov et al., *Solid State Comm.* **152**, 2185 (2012).
5. Н.В. Агринская et al., *Письма в ЖЭТФ* **76**, 420 (2002).
6. Н.В. Агринская et al., *Письма в ЖЭТФ* **80**, 36 (2004).
7. N.V. Agrinskaya et al., *J. Phys.: Condens. Matter.* **22**, 405301 (2010).
8. N.S. Averkiev, A.V. Rodina, *Phys. Solid State* **35**, 538 (1993).



# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МАССАХ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКИ

А.В. Шорохов<sup>1</sup>, М.А. Пятаев<sup>1</sup>, Н.Н. Хвастунов<sup>2</sup>, Т. Нуарт<sup>3</sup>, К.Н. Алексеев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск*

<sup>2</sup>*Мордовский государственный педагогический институт  
им. М.Е. Евсевьева, Саранск*

<sup>3</sup>*Leiden University, Leiden, The Netherlands*

<sup>4</sup>*Loughborough University, Loughborough, United Kingdom*

*E-mail: [alex.shorokhov@mail.ru](mailto:alex.shorokhov@mail.ru)*

Идея создания усилителя и генератора электромагнитного излучения на отрицательных массах носителей тока (NEMAG) была впервые предложена Г. Крёмером [1] еще в 1958 г. на примере отрицательных эффективных масс дырок в германии в электрическом поле. Однако впервые она была реализована экспериментально только в середине 80-х годов [2]. Особенно благоприятные условия для работы по типу NEMAG возникают при приложении к системе постоянного магнитного поля [3].

В настоящей работе мы показали, что данный режим может реализовываться и в полупроводниковой сверхрешетке с минизонным транспортным режимом, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях. В этом случае при определенных условиях может возникнуть инверсная населенность, а эффективная электронная масса может стать отрицательной, что может приводить к усилению высокочастотного, в том числе ТГц, излучения в условиях отсутствия характерных для классических схем усиления нестабильностей, связанных с отрицательной дифференциальной проводимостью. Отметим, что в отличие от квантовых каскадных лазеров, где достижение инверсной населенности уровнями Ландау позволяет создать эффективный квантовый управляемый генератор ТГц излучения [4], динамика электронов в сверхрешетке подчиняется квазиклассическим законам, что принципиально отличает ее от подобных квантовых генераторов излучения.

Справедливость сделанных заключений подтверждается соответствующим аналитическим и численным анализом поглощения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания, проект 2.2665.2014.

1. H. Krömer, Phys. Rev. **109**, 1856 (1958).
2. А.А. Андронов и др., Письма в ЖЭТФ **40**, 221 (1984).
3. А.А. Андронов и др., ЖЭТФ **90**, 367 (1986).
4. François-Régis Jasnot et al., Applied Physics Letters **100**, 102103 (2012).

БЛОХОВСКИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ И ЗИННЕРОВСКОЕ  
ТУННЕЛИРОВАНИЕ  
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ

Ю.Ю. Романова

*Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород*

*E-mail: [jul@impras.ru](mailto:jul@impras.ru)*

В последние десятилетия были достигнуты большие успехи в технологии создания полупроводниковых СР, поэтому изучение поведения электронов в периодическом потенциале в присутствии электрического поля становится особенно актуальным. Работы в этой области были начаты еще в начале прошлого века Ф.Блохом [1], который изучал поведение электрона в объемном кристалле в статическом электрическом поле. Шестью годами позже К.Зинер [2], используя уравнения, полученные в [1], показал, что электрон в периодическом потенциале в отсутствие столкновений должен совершать периодические колебания, ускоряясь под действием статического поля и испытывая брэгговские отражения от границ зон. Эти осцилляции называют блоховскими (или Штарковскими). Их частота определяется как

$$\Omega_c = \frac{eE_c a}{\hbar}, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $E_c$ -напряженность статического поля и  $a$  – постоянная кристаллической решетки,  $\hbar$  - постоянная Планка. Однако, в объемных материалах блоховские осцилляции (БО) наблюдать невозможно, так как электрон рассеивается, не достигнув границы минизоны. Ситуация изменилась с появлением полупроводниковых сверхрешеток (СР), то есть слоисто неоднородных сред с периодически меняющимися в пространстве химическим составом или воздействием на них. Изменения происходят на расстояниях больших периода решетки составляющих их материалов.

В этой же знаменитой работе Кларенс Зинер вывел формулу, описывающую межзонное туннелирование в объёмных кристаллах в статическом электрическом поле, справедливо носящую теперь его имя:

$$R^2(E) = \exp\left(-\frac{\pi(\tilde{\mu}\Delta_g)^{1/2}}{2eE\hbar}\Delta_g\right) \quad (2)$$

где  $\tilde{\mu}^{-1} = m_e^{-1} + m_h^{-1}$ ,  $m_{e,h}$  -эффективные массы электрона и дырки в экстремальных точках зон,  $\Delta_g$ -ширина запрещённой зоны. Эта формула получена в предположении, что туннелирование является слабым и происходит лишь в очень узкой области зоны Бриллюэна вблизи точки сближения соответствующих энергетических зон. Эти условия хорошо выполняются в естественных прямозонных полупроводниках, но неприменимы для сверхрешеток.

Что же изменилось с появлением сверхрешеток? Главная особенность СР, связанная с малыми размерами минизон Бриллюэна, – существование в них блоховских осцилляций (БО) [1,2] терагерцового диапазона и соответствующих уровней Ванье-Штарка [3,4] в сравнительно слабых электрических полях ( $10^2 \div 10^4$  В/см). Например, в СР с периодом  $d=100 \text{ \AA}$  в статическом поле  $E_c=4$  кВ/см частота БО  $f_c \equiv \Omega_c/2\pi \equiv eE_c d/2\pi\hbar \approx 1$  ТГц. Существование БО и соответствующих уровней Ванье-Штарка в СР убедительно подтверждено рядом экспериментальных работ [5-9] (про очень чистые), обнаружен их ангармонизм [10]. В переменных полях (в отличие от статических) брэгговские отражения не создают своего периода колебаний, но сильно модулируют колебания электрона на периоде поля [11]. Для краткости и отличия от блоховских осцилляций, колебания электрона в *периодическом* электрическом поле будем называть блоховскими колебаниями (БК). В спектре БК содержатся только гармоники с частотами кратными частотам поля (и их комбинациям), брэгговские отражения проявляются в сильно немонотонных зависимостях их амплитуд от амплитуд действующего поля. При больших амплитудах переменного поля ( $eEd \gg \hbar\omega$ ) БК содержат гармоники очень высокого порядка, что является прямым следствием большого числа брэгговских отражений на периоде поля. Например, в гармоническом поле  $n$ -ая гармоника БК пропорциональна  $J_n(eEd/\hbar\omega)$  – функции Бесселя  $n$  – ого порядка.

БО являются основной причиной существования статической (низкочастотной) и динамической (высокочастотной) [12,13] отрицательных дифференциальных проводимостей (ОДП) СР. На основе статической ОДП СР уже созданы гигагерцовые (до 150 ГГц) генераторы ганновского типа [14]. А вот с генератор непосредственно на блоховских осцилляциях все еще не создан.

Основная причина неудач создания блоховского генератора (БГ), на наш взгляд, - использование неоптимальных структур СР, а именно, структур с гсинусоидальным законом дисперсии, в которых блоховские осцилляции – чисто гармонические. В таких СР динамическая ОДП на частоте  $\omega$  возникает в поле с блоховской частотой  $\Omega_c > \sqrt{\omega^2 + \tau^{-2}}$  [13] ( $\tau$  – время свободного пробега электрона), т.е. обязательно только на участках ВАХ со статической ОДП. Поэтому генерация терагерцовых колебаний подавляется развитием относительно низкочастотной доменной неустойчивости (эффектом Ганна). Для создания терагерцового БГ требуется наличие высокочастотной ОДП на участках ВАХ с положительной статической дифференциальной проводимостью. С целью выявления таких возможностей нами были исследованы статическая и динамическая дифференциальные проводимости СР в зависимости от закона дисперсии минизоны и характера рассеяния электронов в них [15-18].

Исследования показали:

1. Создавая ангармонические БО, можно разнести по статическому электрическому полю области статической и динамической ОДП. Перспективными при этом являются СР с минизонами, в значительной части которых эффективная масса электрона положительна и уменьшается с ростом его энергии («антиганновский» вариант). В таких СР одновременно область статической ОДП сдвигается (по сравнению с СР с синусоидальной минизонной) в сторону сильных полей, а область динамической ОДП – в сторону слабых. Это и позволяет отстроиться от конкурирующей относительно низкочастотной доменной неустойчивости в условиях генерации терагерцового излучения.

2. В СР с шириной минизоны порядка энергии оптического фонона возникает двойной резонанс на четных гармониках БО (т.к. в таких СР время набора электроном энергии оптического фонона составляет примерно половину времени пролета им минизоны Бриллюэна), а низкочастотная ОДП может отсутствовать во всей области статического поля. И здесь предпочтительнее (с целью повышения величины высокочастотной ОДП) является указанный выше тип СР.

3. Сверхрешетки с высокочастотными блоховскими колебаниями и осцилляциями могут быть использованы для получения терагерцовой генерации в периодических импульсных электрических полях со скважностью, обеспечивающей остывание разогреваемых полем электронов.

Предлагаемый нами энергетический спектр минизон можно реализовать в электронных СР со сложной элементарной ячейкой и в дырочных СР со сложной валентной зоной исходного материала. Например, квазипараболический закон дисперсии электронов может быть сформирован в СР со сложной элементарной ячейкой, содержащей двойную или тройную квантовую яму (энергетический зазор  $\sim 1-10$  мэВ). Её энергетический спектр содержит две (три) близко расположенные минизоны, удаленные на значительное ( $\geq 100$  мэВ) расстояние по энергии от последующих [18-19]. В этом случае, в соответствии с приближением почти свободных электронов, закон дисперсии нижней минизоны (или первых двух нижних) – квазипараболический, что (из-за значительного ангармонизма блоховских осцилляций) уже создает принципиальную возможность возникновения терагерцовой ОДП на участках ВАХ с положительной дифференциальной проводимостью в условиях стриминга [20,21].

В таких структурах уже в относительно слабых электрических полях ( $10^2 \div 10^4$  В/см) начинает проявляться межминизонное туннелирование. Оно существенно меняет характер динамики электрона в СР и приводит к дополнительным особенностям ее электрических характеристик. В частности, как впервые показано в [22], оно также может приводить к существованию терагерцовой ОДП в областях положительной статической

дифференциальной проводимости. Формула Зинера (2) в СР требует существенного уточнения, т.к. (1) эффективные массы электронов отличаются в разных слоях, а не только в зонах; (2) в СР с относительно узкими разрешенными и запрещенными энергетическими минизонами туннелирование электрона, как правило, происходит в значительной области квазиимпульсного пространства, а не только в окрестности точки максимальной близости минизон. Это приводит к существенной немонотонной зависимости вероятности туннелирования  $R^2(E)$  от начального и конечного значений квазиимпульса электрона и к осцилляторной зависимости вероятности его межминизонного туннелирования от поля и времени при однократном прохождении им минизоны Бриллюэна. [5,6,20]. Аналогичные осцилляции возникают и в ландау-зинеровских переходах [5,12].

Нами была разработана модель, позволяющая уточнить формулу Зинера и описывающая туннелирование в СР с различным уровнем межминизонного взаимодействия [23-24]. Было показано, что (1) неоднородность эффективной массы электрона образующего СР материала приводит к уменьшению вероятности туннелирования даже без учета изменения минизонной структуры СР; (2) в условиях кроссинга одноминизонных ванье-штарковских уровней (т.е. в полях, в которых возникает резонансное зинеровское туннелирование) вероятность туннелирования на периоде минизоны Бриллюэна принимает минимальные, близкие к нулю, значения, а не максимальные как ожидалось.

Таким образом, в настоящей лекции будут рассмотрены следующие вопросы:

- Блоховские колебания (осцилляции) в полупроводниках и полупроводниковых СР;
- Экспериментальное наблюдение отдельных блоховских осцилляций;
- Возможность и способы создания СР с различными законами дисперсии и особенности движения электронов в них, в том числе и с учетом межминизонного рассеяния;
- Особенности межминизонного туннелирования в СР с различным уровнем межминизонного взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН, РФФИ (грант 13-02-00734).

1. F. Bloch, Z. Physik 52, 555 (1928).
2. C. Zener, Proc. Roy. Soc. London Ser. A 145, 523 (1934).
3. G.H. Wannier, Phys. Rev. 117, 432 (1950).
4. G.H. Wannier, Rev.Mod. Phys. 34, 645 (1962).
5. J. Feldmann, K. Leo, J. Shah et.al., Phys. Rev. B 46, 11, 7252 (1992)

6. C. Waschke, H. G. Roskos, R. Schwedler, et.al., Phys. Rev. Lett. **70**, 3319 (1993).
7. V.G. Lyssenko, G. Valusis, F. Löser, et.al., Phys. Rev. Lett. **79**, 301 (1997).
8. M. Sudzius, V. G. Lyssenko, F. Löser, K. et.al., Phys. Rev. B **57**, R12693 (1998)
9. F. Löser, Yu. A. Kosevich, et.al., Phys. Rev. B **61**, R13373 (2000).
10. К.Л. Литвиненко, Л.Кехлер, К. Лео и др., Письма в ЖЭТФ **67**, 829 (1998).
11. M. C. Wanke, A. G. Markelz, K. Unterrainer, et.al., in Phys. Semicond. (ed. N. Scheffter and R. Zimmerman, World scient., Singapore) P. 1791 (1996)
12. Н. Kroemer, cond-mat/0007482; cond-mat/0009311.
13. С.А. Ктиторов, Г.С. Симин, В.Я. Синдаловский, ФТТ **13**, 2230 (1971).
14. E. Schomburg, R. Scheuerer, S. Brandl et al., Electron Lett. **35**, 12 (1999).
15. Yu. A. Romanov, L. G. Mourokh, N. J. M. Horing. J. Appl. Phys., **93**, 4696 (2003).
16. Ю. А. Романов, Ю. Ю. Романова, ФТТ **46**, 162 (2004).
17. Ю. А. Романов, Ю. Ю. Романова, ФТП **39**, 1, 162 (2005).
18. Ю.Ю. Романова, М.Л. Орлов, Ю.А. Романов, ФТП **46**, 11, 1475 (2012).
19. Ю.Ю. Романова, Е.П. Додин, Ю.Н. Ноздрин и др. *Труды XVIII международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника»* (Нижний Новгород, 10-14 марта, 2014г.), 607.
20. А.А. Андронов, В.А. Козлов. Письма в ЖЭТФ **17**, 124 (1973)
21. Л.Е. Воробьев и др., Письма в ЖЭТФ **73**, 263, (2001).
22. Л. К. Орлов, Ю. А. Романов, Изв. Вузов СССР Радиофизика **32** (3), 282 (1989).
23. Ю. Ю. Романова, Е. В. Демидов, Ю. А. Романов, Изв. РАН. Сер. Физическая. **74**, 106 (2010).
24. J. Yu. Romanova, E. V. Demidov, L. G. Mourokh, and Yu. A. Romanov. J. Phys.: Condens. Matter **23**, 30 305801 (2011)

# ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ОТКРЫТОМ КВАНТОВОМ КОЛЬЦЕ СО СПИН-ОРИБТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

А.А. Григорькин<sup>1</sup>, М.А. Пятаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Петербургский институт ядерной физики имени Б.П.Константинова  
НИЦ «КИ», Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
E-mail: [ale-grig@yandex.ru](mailto:ale-grig@yandex.ru)*

В последние годы растет интерес к управлению электронными спинами посредством электрического поля, поскольку данный метод обладает определенными преимуществами по сравнению с магнитными методами управления.

В данной работе рассматривается система, состоящая из квантового кольца, соединенного одномерными проводниками с двумя электронными резервуарами. Кольцо освещается монохроматическим циркулярно поляризованным излучением, поэтому его гамильтониан гармонически зависит от времени. В гамильтониан кольца входят слагаемые, отвечающие спин-орбитальному взаимодействию Рашбы, благодаря чему электрическое поле излучения может влиять на спиновые степени свободы электрона. Контакты кольца с проводниками рассматриваются как рассеивающие потенциалы нулевого радиуса.

В случае, когда провода подключены к кольцу несимметрично, или когда имеет место различие рассеивающих свойств «левого» и «правого» контактов, данная система не имеет центра инверсии. Следствием этого является фотогальванический эффект – возникновение в проводах постоянного тока под действием оптического возмущения.

В данной работе предложен метод расчета, позволяющий аналитически вычислить квазиэнергетические электронные состояния в системе с учетом упругого рассеяния на контактах и неупругого взаимодействия с излучением. Найден соответствующий им фотоиндуцированный постоянный ток. Показано, что существуют два механизма возникновения фототока, которые можно охарактеризовать как линейный (ЛФГЭ) и циркулярный (ЦФГЭ) фотогальванические эффекты. при нулевом (либо целом) магнитном потоке ЛФГЭ не зависит от направления циркулярной поляризации падающего излучения, в то время как ток, обусловленный ЦФГЭ, меняет знак при смене направления поляризации.

В общем случае фототок обладает сложной зависимостью от параметров системы – частоты излучения, уровня Ферми, положения точек контактов на кольце и длин рассеяния контактов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания (проект № 2.2665.2014).

# ВЛИЯНИЕ КРАЕВОЙ ДИСЛОКАЦИИ НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В КВАНТОВОЙ ПРОВОЛОКЕ ВО ВНЕШНЕМ ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В.Д. Кревчик, В.Н. Калинин, Е.Н. Калинин  
 Пензенский государственный университет, Пенза  
*E-mail: physics@pnzgu.ru*

Выполнены расчёты подвижности электронов в квантовой проволоке из GaAs с краевой дислокацией при наличии внешнего продольного относительно оси проволоки однородного магнитного поля. На рис. 1 представлена рассчитанная температурная зависимость подвижности электронов при различных параметрах дислокации ( $a_0^*$  – расстояние между акцепторными центрами в дислокационной линии;  $f_0^*$  – вероятность заполнения акцепторных центров) и величины магнитного поля  $B$ . Также приведена кривая для подвижности электронов при рассеянии на LA-фононах построенная по формуле, взятой из работы [1].

Из рис. 1 следует, что вклад механизма релаксации связанного с рассеянием электронов на краевой дислокации зависит от величины параметра  $f_0^*$  (сравн. кривые 2 и 6). При  $f_0^* \ll 0.15$  данный механизм в области температур от 50 до 100 К может быть существенным в сравнении с рассеянием на акустических фононах (сравн. кривые 1 и 4). В магнитном поле подвижность электронов уменьшается за счёт сжатия электронной волновой функции в радиальной плоскости КП (сравн. кривые 5 и 4). Таким образом, рассмотренный механизм рассеяния может быть существенным в сравнении с рассеянием на LA-фононах, при этом температурный интервал его эффективности определяется величиной вероятности заполнения акцепторных центров в дислокационной линии.

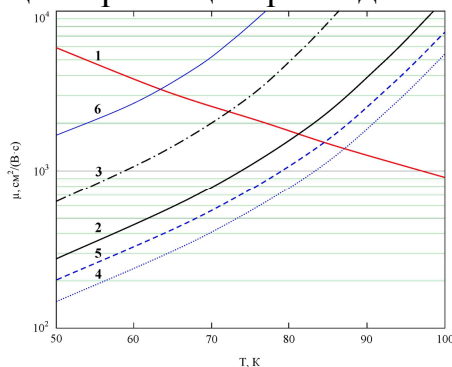


Рис. 1. Температурная зависимость подвижности электронов в GaAs КП: **1** – рассеяние на LA-фононах; **2-6** – рассеяние на краевой дислокации (кривые **1-3, 6** построены при  $B = 0$  Тл; кривая **5** при  $B = 2$  Тл) для различных значений параметров дислокационной линии  $a_0^*$  и  $f_0^*$ : **2** –  $a_0^* = 0,65$  нм;  $f_0^* = 0,15$ ; **3** –  $a_0^* = 0,65$  нм;  $f_0^* = 0,12$ ; **4** –  $a_0^* = 0,5$  нм;  $f_0^* = 0,15$ ; **5** –  $a_0^* = 0,65$  нм;  $f_0^* = 0,15$ ; **6** –  $a_0^* = 0,65$  нм;  $f_0^* = 0,11$ .

1. Н.А. Поклонский, Е.Ф. Кисляков, С.А. Вырко, ФТП **37** (6), 735 (2003).



# ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ КВАНТОВОЙ ПРОВОЛОКЕ

В.В. Карпунин<sup>1</sup>, В.А. Маргулис<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мордовский государственный педагогический институт  
им. М.Е. Евсевьева, Саранск

<sup>2</sup>Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева, Саранск  
E-mail: [theorphysics@mrsu.ru](mailto:theorphysics@mrsu.ru)

Исследование оптических свойств низкоразмерных систем является одной из важнейших направлений современной физики. Оптические свойства трехмерной квантовой проволоки и квантового цилиндра теоретически исследованы в [1]. Получены аналитические выражения коэффициентов поглощения, установлена форма резонансной кривой.

Исследованию гибридно – фононного резонанса в трехмерной анизотропной параболической квантовой яме посвящена работа [2]. Установлена форма резонансного пика и показана его дублетная структура.

Целью работы является получение и исследование коэффициента поглощения электромагнитного излучения в квантовой проволоке. Расчет проведен в первом порядке теории возмущений [1]. Рассмотрен случай круговой поляризации электромагнитной волны и невырожденного электронного газа. Получена дублетная структура резонансного пика, которая должна наблюдаться на частотах параболического потенциала конфинмента (рис.1). В случае равенства этих частот, возникает только один резонансный пик большей интенсивности.

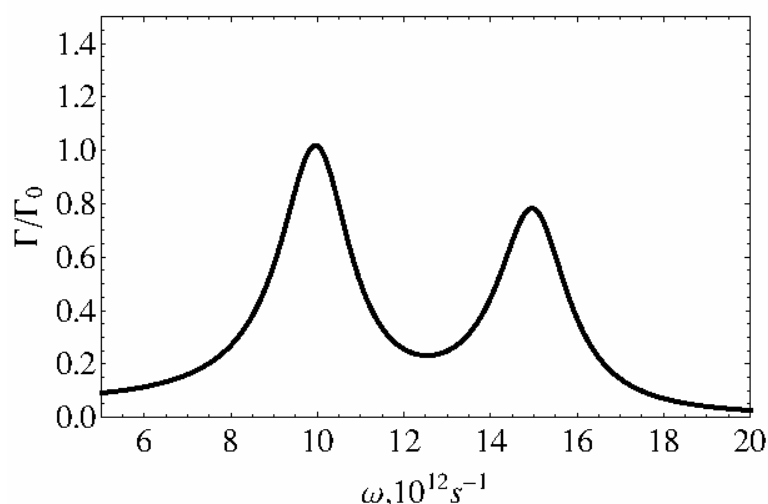


Рис 1. Зависимость коэффициента поглощения электромагнитного излучения от частоты излучения  $\omega_1 = 10 \cdot 10^{12} \text{ c}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 15 \cdot 10^{12} \text{ c}^{-1}$ ,  $\tau = 10^{-12} \text{ c}$ ,  $T = 100 \text{ K}$  (круговая поляризация).

1. Н.Г. Галкин, В.А Маргулис., А.В. Шорохов, ФТТ **43**, 511-519 (2001).
2. V.A. Margulis, A.V Shorokhov., Phys.Rev. B. **66**, 165324(1)-165324(6) (2002).

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ 1D- ТУННЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

В.Д. Кревчик<sup>1</sup>, М.Б. Семенов<sup>1</sup>, Р.В. Зайцев<sup>1</sup>, П.В. Кревчик<sup>1</sup>, Д.О. Филатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород

*E-mail: [filatov@phys.unn.ru](mailto:filatov@phys.unn.ru)*

Представлены результаты эксперимента по визуализации локальной плотности состояний в квантовых точках InAs/GaAs(001) методом туннельной атомно-силовой микроскопии в сверхвысоком вакууме. Предложена модель 1D – диссипативного туннелирования [1] для интерпретации обнаруженных на эксперименте особенностей туннельных вольт-амперных характеристик контакта зонда атомно-силового микроскопа к поверхности квантовой точки. Найдено, что влияние двух локальных мод широкозонной матрицы на вероятность 1D – диссипативного туннелирования приводит к появлению нескольких неэквидистантных пиков в соответствующей полевой зависимости. Показано, что теоретическая зависимость качественно согласуется с экспериментальной вольт-амперной характеристикой контакта зонда атомно-силового микроскопа к поверхности квантовой точки InAs/GaAs(001).

В работе рассчитана вероятность 1D – диссипативного туннелирования в модельном двухъямном осцилляторном потенциале с учетом влияния двух промотирующих локальных фононных мод широкозонной матрицы в условиях внешнего электрического поля при конечной температуре. Рассмотрены как осциллирующий режим туннельного переноса в пределе слабой диссипации, так и неосциллирующий. Диссипативный режим туннелирования в пределе слабой диссипации, вероятно, может быть характерен для вырожденных полупроводников наряду с распространенным механизмом резонансного туннелирования. Именно осциллирующий режим диссипативного туннельного переноса нерезонансной природы позволил теоретически выявить хорошее качественное согласие с имеющимися экспериментальными данными. При экспериментальном исследовании туннельного спектра КТ учитывалось, что при комнатной температуре возможны процессы туннелирования электронов с поглощением и испусканием фононов. Следует отметить, что ранее [1] при интерпретации туннельных спектров КТ InAs/GaAs(001) данное обстоятельство не учитывалось.

Таким образом, наряду с режимом резонансного туннелирования [1], как предполагалось ранее, необходимо также учитывать вклад диссипативного осциллирующего режима (в пределе «слабого» затухания), который может проявляться в туннельных ВАХ для полупроводниковых КТ, помещенных в широкозонную матрицу.

Авторы благодарны Б.Н. Звонкову за выращивание образцов и П.А. Бородину за проведение экспериментов.

1.Э. Леггет, А.К. Арынгазин, М.Б. Семенов, В.Д. Кревчик, Ю.Н. Овчинников, К. Ямамото, *Управляемое диссипативное туннелирование. Туннельный транспорт в низкоразмерных системах*, М.: Физматлит, 2011-2012.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭФФЕКТА ДЖОЗЕФСОНА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МАССИВАХ КОНТАКТОВ ДЖОЗЕФСОНА

О.Д. Позднякова, А.В. Шорохов

*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

*E-mail: [pozdn-olesya@yandex.ru](mailto:pozdn-olesya@yandex.ru)*

Известно, что если ток через джозефсоновский контакт превышает некоторое критическое значение, обусловленное свойствами самого контакта, на контакте возникает разность потенциалов, что приводит к нестационарному эффекту Джозефсона [1]. Вблизи критической температуры для анализа высокочастотных явлений удобно использовать резистивную модель [2], согласно которой джозефсоновский контакт может быть представлен в виде параллельного соединения идеального джозефсоновского контакта, через который течёт только бездиссипативный ток куперовских пар, и резистивного элемента с активным сопротивлением, через который течёт диссипативный ток одиночных электронов проводимости (нормальный ток). В рамках данной модели в [3] было найдено активное сопротивление точечного джозефсоновского контакта в слабосигнальном приближении и показано, что в такой системе возможно параметрическое усиление внешнего высокочастотного излучения благодаря джозефсоновскому излучению, выполняющему роль излучения накачки [3,4].

В данной работе мы продолжаем развивать идеи, высказанные в [3,4], применительно к массивам контактов Джозефсона, в частности, используя резистивную модель, находим поглощённую мощность внешнего сигнала произвольной амплитуды при различных параметрах системы, а также максимальную мощность неджозефсоновского излучения в режиме заданного тока. Мощность такого излучения одиночным контактом слишком мала для практического применения, поэтому большой интерес представляют массивы джозефсоновских контактов, позволяющие получить более или менее удовлетворительную мощность [5]. В связи с этим, нами были теоретически изучены высокочастотные свойства массивов из большого числа джозефсоновских контактов с пренебрежимо малой внутренней ёмкостью, связанных внешней нагрузкой и синхронизированных. Численно найденная нами максимальная мощность излучения имеет порядок нескольких мкВт, что согласуется с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания, проект 2.2665.2014.

1. B.D. Josephson, Phys. Lett. **1**, 251 (1962).
2. Л.Г. Асламазов, А.И. Ларкин, Письма в ЖЭТФ **9**, 47 (1969).
3. А.Н. Выставкин, В.Н. Губанков, Л.С. Кузьмин, К.К. Лихарев, В.В. Мигулин, Радиотехника и электроника **15**, 896 (1971).
4. F. Auracher and T. Van Duzer, J. Appl. Phys. **44**, 848 (1973).
5. F. Song et al., Appl. Phys. Lett. **98**, 142506 (2011).

# ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ГРАФЕНОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКИ

С.В. Крючков<sup>1,2</sup>, Е.И. Кухарь<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Волгоградский государственный социально-педагогический университет,  
Лаборатория физики низкоразмерных систем, Волгоград.

<sup>2</sup>Волгоградский государственный технический университет, Волгоград  
E-mail: [eikuhar@yandex.ru](mailto:eikuhar@yandex.ru)

Структуры со сверхрешетками (СР) вызывают интерес в связи с проблемой так называемого терагерцового (ТГц) генератора [1,2]. В [2] для устранения подавления генерации ТГц колебаний доменной неустойчивостью предлагалось использовать СР, в которых блоховские осцилляции являются негармоническими. В качестве такой структуры можно взять СР на основе графена (ГСР), электронный спектр которой имеет вид [3]. Вычисление продольной вольтамперной характеристики (ВАХ) для ГСР, подверженной электромагнитному (ЭМ) излучению частотой  $\omega$ , показывает, что кроме резонанса  $\omega_B = \pm\omega$ , возникающего также для СР на основе AlGaAs/GaAs [4], имеются дополнительные (дробные) резонансы:  $\omega_B = \pm\omega/2, \pm\omega/3, \dots$  (рис. 1,  $\omega_B = eEd$ ,  $d$  – период СР). Можно надеяться, что участки отрицательной дифференциальной проводимости, вблизи дробных резонансов в ВАХ ГСР, будут возникать до появления доменной неустойчивости.

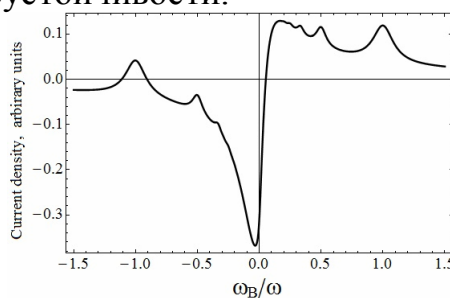


Рис. 1. ВАХ ГСР,  $d=2 \times 10^{-6}$  см,  $\omega=10^{13}$  с<sup>-1</sup>.

Работа поддержана грантом РФФИ № 13-02-97033 р\_поволжье\_a, и выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания №2014/411 (код проекта: 522).

1. С.А. Ктиторов, Г.С. Симин, В.Я. Синдаловский, ФТТ **13**, 2230 (1971).
2. Ю.А. Романов, Ю.Ю. Романова, ФТП **39**, 162 (2005).
3. M. Killi, S. Wu, A. Paramekanti, Int. J. Mod. Phys. B. **26**, 1242007 (2012)
4. Д.В. Завьялов, С.В. Крючков, Е.И. Кухарь, ФТП **41**, 726 (2007).

# ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОТОТОК ЧЕРЕЗ КВАНТОВУЮ ПРОВОЛОКУ С ПРИМЕСЬЮ

М.А. Пятаев<sup>1</sup>, С.Н. Ульянов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск*

<sup>2</sup>*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва*

*E-mail: [ulyanovsn@mail.ru](mailto:ulyanovsn@mail.ru)*

В настоящей работе рассматривается влияние продольного магнитного поля на фототок в квантовой проволоке с асимметрично расположенной примесью. Интерес к проблеме связан с возможностью использования рассматриваемого эффекта для создания миниатюрного детектора инфракрасного диапазона с управляемой магнитным полем чувствительностью. Проволока моделируется с помощью двумерного параболического потенциала, а примесь – с помощью потенциала нулевого радиуса. Для нахождения фототока используется метод, применявшийся ранее в работах [1-2] для исследования фотогальванического эффекта в квантовых каналах в отсутствие магнитного поля.

В работе получены явные аналитические выражения для фототока через квантовую проволоку при произвольном расположении примеси и магнитном поле. Показано, что наличие магнитного поля приводит к усложнению электронного спектра и связыванию движения электрона вдоль перпендикулярных оси проволоки направлений. Использование двумерного параболического потенциала для моделирования проволоки позволяет перейти к гибриднему потенциалу конфайнмента, учитывающему магнитное поле. Зависимость фототока от химпотенциала при этом демонстрирует линейно возрастающие осцилляции, положение которых смещается в сторону больших значений химпотенциала при увеличении магнитного поля, что связано с увеличением гибридной частоты конфайнмента. Кроме того, в магнитном поле имеет место расщепление коэффициентов прохождения электронов по магнитному квантовому числу, что в достаточно сильных полях (порядка 1 Тл и выше) приводит к существенному изменению формы кривой зависимости фототока от химического потенциала. В общем случае система обладает двумя резонансными частотами, зависящими от магнитного поля, что обуславливает расщепление пиков фототока на кривой его зависимости от частоты излучения. При этом большее значение фототока достигается при меньшей из резонансных частот. Увеличение температуры приводит к сглаживанию формы пиков фототока и медленному уменьшению их амплитуд в области баллистического транспортного режима. Фототок линейно зависит от интенсивности падающего излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания (проект №, 2.2665.2014).

1. М.А. Pyataev, S.N. Ulyanov, Phys. Rev. B **79**, 235428 (2009).
2. В.А. Маргулис, М.А. Пятаев С.Н. Ульянов, ФТП **47**, 1221 (2013)

# НОВЫЕ СЦЕНАРИИ ТУННЕЛИРОВАНИЯ МЕЖДУ КВАЗИЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УРОВНЯМИ КУБИТА В ПОЛЕ БИГАРМОНИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА

М.В. Денисенко, А.М. Сатанин

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [mar.denisenko@gmail.com](mailto:mar.denisenko@gmail.com)*

В последнее время эффект туннелирования Ландау-Зинера [1,2] активно используется для спектроскопии кубитов [3]. Сверхпроводниковые кубиты реализуются на основе ниобиевых петель микронных размеров, в которые встраиваются джозефсоновские переходы, обладающие емкостью и нелинейной индуктивностью. Джозефсоновские осцилляторы характеризуются высокой добротностью и возможностью манипулировать их состояниями прикладывая сравнительно слабые постоянные и переменные поля. Благодаря этим особенностям в последнее время в джозефсоновских кубитах удалось наблюдать ландау-зинеровские переходы и измерить туннельное расщепление уровней кубита [4].

В данной работе изучаются динамика населенности джозефсоновского кубита, возбуждаемого бигармоническим импульсом большой амплитуды (по сравнению с другими энергетическими параметрами системы). Динамика кубита в переменном поле описывается уравнением Шредингера. Как известно, в сильном поле населенность кубита эволюционирует адиабатически, кроме как в непосредственной близости от квазипересекающихся уровней, где наблюдаются квантово-когерентные переходы Ландау – Зинера, темп которых контролируется видом управляющего поля [4]. Мы покажем, что подавая на кубит импульсы более общего вида, можно реализовать сценарий туннелирования, который качественно отличается от стандартного сценария Ландау-Зинера. Путем управления параметрами возбуждающего бигармонического импульса (относительной амплитудой и фазой импульса) можно организовать различные сценарии эволюции квазиэнергетических состояний кубита, в отличие от импульсов монохроматического поля. В данной работе рассмотрены три основных сценария туннелирования: 1) линейный сценарий сближения квазиуровней (модель Ландау-Зинера); 2) квадратичный сценарий (параболическое сближение уровней) и 3) кубический сценарий (образование затянутых «плато» в динамике квазиуровней кубита). В этом случае темп переходов зависит также от относительной фазы импульсов, что дает новый метод фазового контроля состояний кубита.

1. L. D. Landau, Phys. Z. Sowjetunion 2, **46** (1932).
2. C. Zener, Proc. R. Soc. A **137**, 696 (1932).
3. A. Izmailkov et al., Europhys. Lett. **65**, 844 (2004).
4. S.N. Shevchenko, S. Ashhab, Franco Nori, Phys. Reports 492, **1** (2010).

# ВОЗМОЖНОСТЬ УСИЛЕНИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКОЙ, ПОМЕЩЕННОЙ В СКРЕЩЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАГНИТНОЕ ПОЛЯ

М.А. Пятаев<sup>1</sup>, А.В. Шорохов<sup>1</sup>, Д.С. Приймак<sup>2</sup>, К.Н. Алексеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск*

<sup>2</sup>*Loughborough University, Loughborough, United Kingdom*

*E-mail: [pyataevma@gmail.com](mailto:pyataevma@gmail.com)*

В работе на основе квазиклассического подхода рассмотрено поглощение электромагнитного излучения полупроводниковой сверхрешеткой, помещенной в скрещенные электрическое и магнитное поля. В рамках этого подхода отклик системы на внешнее переменное поле удается выразить через решение одноэлектронного уравнения движения, которое в данном случае оказывается аналогичным уравнению движения классического ангармонического маятника [1]. Как известно, при отсутствии внешней вынуждающей силы у ангармонического маятника существуют два режима движения – колебательный и вращательный. В случае электронов в сверхрешетке этим режимам движения соответствуют два типа осцилляций – циклотронные и блоховские. Блоховские осцилляции соответствуют отрицательной дифференциальной проводимости, которая приводит к росту волн зарядовой плотности, что, как правило, препятствует усилению внешнего высокочастотного сигнала. Однако при некоторых параметрах системы в режиме нелинейных циклотронных осцилляций можно добиться отрицательного поглощения даже при положительной дифференциальной проводимости (ПДП). [1]

В отличие от рассмотренного ранее предела низких температур [1], для которого считалось, что в равновесии все электроны сконцентрированы вблизи дна минизоны, в настоящей работе исследуется случай произвольной температуры и для описания равновесного состояния используется функция распределения Ферми-Дирака. Показано, что вклад в ток и в поглощение электромагнитного излучения различен для разных частей зоны Бриллюэна, поэтому обе указанные величины существенно зависят от температуры. В частности, с ростом температуры максимум вольт-амперной характеристики сверхрешетки смещается в область меньших полей, а напряженность электрического поля, при которой, возможно усиление, увеличивается. Одновременное выполнение условий отрицательного поглощения и ПДП остается возможным до температур порядка нескольких десятков кельвин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания (проект № 2.2665.2014).

1. T. Nyart, J. Mattas, and K. N. Alekseev, Phys. Rev. Lett. **103**, 117401 (2009).

## МНОГОФОТОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ КУБИТОВ

М.В. Денисенко, В.О. Муняев, А.М. Сатанин

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,*

*Нижний Новгород*

*E-mail: [sarkady@mail.ru](mailto:sarkady@mail.ru)*

В последнее время в связи с развитием квантовой информатики и нанотехнологий большое внимание уделяется изучению поведения сверхпроводниковых джозефсоновских потоковых кубитов во внешних полях. Такие свойства, как малое время релаксации, малая диссипация и др, делают их перспективными кандидатами на роль логических элементов квантового компьютера, устройств кодирования и передачи информации.

Огромное внимание уделяется вопросу спектроскопического исследования кубитов, как одному из способов получения информации об энергетических уровнях системы кубитов, населенностях уровней, шумах, действующих на систему и т.д. Разработанная методика амплитудной спектроскопии, в основе которой лежит метод получения информации с помощью функции отклика по амплитудам постоянного и переменного поля сигнала при фиксированной частоте, обладает рядом преимуществ по отношению к применяемой ранее Раби-спектроскопии. Данная методика позволяет изучать систему в широком диапазоне изменения амплитуды и многофотонные переходы.

Главной задачей данной работы является изучение переходов между состояниями двух связанных кубитов и применение техники амплитудной спектроскопии к такой системе.

Дается краткое описание конструкции и принципа функционирования сверхпроводящего кубита с тремя джозефсоновскими переходами (3JJ кубит), описываются различные способы связи кубитов, а также приводится гамильтониан для двух связанных кубитов. Далее показывается, что изучение динамики двух симметричных (т.е. одинаковых) связанных кубитов может быть эффективно сведено к задаче о динамике трехуровневой системы.

Основная часть работы посвящена теоретическому и численному изучению динамики трехуровневой системы в гармоническом внешнем поле. В рамках приближения вращающейся волны формулируются условия резонансных переходов между собственными состояниями системы. Приводится нестационарная теория возмущения для малого параметра туннельного расщепления. Обсуждаются различные способы усреднения результатов, применяемые на опыте и квазиэнергетическая концепция, которая оказывается полезной при изучении динамики систем в периодическом поле.



# STUDY OF DOMAIN INSTABILITY IN STRONGLY-COUPLED SEMICONDUCTOR STRUCTURE

V.A. Maksimenko<sup>1,2</sup>, A.A. Koronovskii<sup>1,2</sup>, V.V. Makarov<sup>1,2</sup>, K.N. Alekseev<sup>3</sup>,  
A.G. Balanov<sup>2,3</sup>, A.E. Hramov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Saratov State University, Saratov, Russia*

<sup>2</sup>*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia*

<sup>3</sup>*Loughborough university, Loughborough, UK*

*E-mail: [hramovae@gmail.com](mailto:hramovae@gmail.com)*

The periodic semiconductor structures, superlattices, consisting of the alternated layers of different semiconductor material, were first proposed by Leo Esaki and Raphael Tsu [1] as a nonlinear media where the ultrafast Bloch oscillations and electron scattering gave the reason for negative differential conductivity. The possibility of THz Bloch oscillations immediately made the superlattice the promising structure for generation of coherent THz radiation. Despite a variety of scientific researches aimed to this problem, the Bloch oscillator is practically still not realized because of the electrical instabilities, which appear in superlattice with onset of Bloch oscillations [2].

These instabilities cause the formation of areas with large volume electron density (domains of charge) which propagate through the structure and give the reason for current oscillations. The presence of domains is destructive for coherent Bloch oscillations since it makes the electric field inhomogeneous. At the same time, the domain transport is also prospective for the generation of sub-THz/THz current oscillations. The recent works evident, that the frequency of current domain oscillations can be increased up to several hundred GHz [3]. Moreover, the properties of the obtained oscillations can be effectively controlled by external magnetic field [4] and resonant systems [5]. So, the instability, occurred in semiconductor superlattice is the important phenomena for both fundamental and applied science, which requires the detailed analysis.

In the current work we present the stability analysis of the GaAs-AlGaAs superlattice [6], based on the consideration of the small perturbations of the steady state. As a result we show that the instability development and domain formation is accompanied by the appearance of the perturbation which increases in time and provide the strong possibility to predict the circumstances for which the charge transport through the structure remains stable.

This research is supported by the Russian Federation of Basic Researcher (Grant № 12-02-33071), and President Program (Grant MD-345.2013.2 and NSH-828.2014.2).

1. L. Esaki, R. Tsu, IBM J. Res. Dev. **14**, 61 (1970).
2. M. Büttiker, H. Thomas, Phys. Rev. Lett. **38**, 78 (1977).
3. E. Schomburg, et al., Appl. Phys. Lett. **74**, 2179 (1999).
4. A.A. Koronovskii, et al., Phys. Rev. B. **88**, 165304(2013).
5. A.E. Hramov, et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 116603 (2014).
6. T.M. Fromhold et al., Nature, **428**, 726 (2004).

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕШНЕЙ РЕЗОНАНСНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ВНЕШНЕГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА В СУБТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ

В.В. Макаров<sup>1,2</sup>, А.А. Короновский<sup>1,2</sup>, В.А. Максименко<sup>1,2</sup>, А.Г. Баланов<sup>3</sup>,  
А.Е. Храмов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский государственный технический университет, Саратов*

<sup>2</sup>*Саратовский государственный университет, Саратов*

<sup>3</sup>*Университет города Лафборо, Великобритания*

*E-mail: [vladmak404@gmail.com](mailto:vladmak404@gmail.com)*

Полупроводниковые сверхрешетки представляют собой наноструктуру, состоящую из нескольких слоев различных (двух и более) полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны, что приводит к периодической модуляции зоны проводимости[1]. При превышении определенного порогового напряжения в данной структуре может возникать неустойчивость, приводящая к возникновению электронных сгустков (доменов), распространяющихся в продольном направлении. Частота следования этих доменов может достигать сотен гигагерц, что делает сверхрешетку перспективным элементом усилителей терагерцового и суб-терагерцового диапазона[2].

Использование внешних резонансных систем является широко известным методом для повышения характеристик различных устройств в оптике и радиоэлектронике. В том числе внешний резонатор может быть использован для повышения частоты генерации или усиления внешнего сигнала. Ранее нами было показано, что подключение внешнего резонатора способствует возникновению хаотических и квазипериодических режимов колебаний заряда в сверхрешетке[3]. В данной работе рассматривается возможность использования внешней резонансной системы для усиления ВЧ сигнала в суб-ТГц диапазоне полупроводниковой сверхрешеткой.

Было показано, что в автономной полупроводниковой сверхрешетке усиление внешнего сигнала возможно только на частотах ниже чем частота доменного транспорта (основная частота генерации тока в сверхрешетке). В то же время подключение внешней резонансной системы позволяет получить усиление внешнего сигнала в суб-ТГц диапазоне, на частотах, лежащих существенно выше основной частоты генерации в системе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-02-33071), Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № 3.23.2014/К, Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-345.2013.2), программой поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-828.2014.2),.

1. L. Esaki, R. Tsu, IBM J. Res. Develop. **14**, 1 (1970).
2. T. Nyart, et al. Phys. Rev. B. **77**, 165330 (2008).
3. Храмов А.Е., et al, Phys. Rev. Lett. **112**, 116603 (2014).

## ОТКРЫТЫЙ КВАНТОВЫЙ БИЛЛИАРД В МАГНИТНОМ ПОЛЕ КАК СПИНОВЫЙ ФИЛЬТР

А.И. Малышев, Г.Г. Исупова

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [isupova@phys.unn.ru](mailto:isupova@phys.unn.ru)*

Как известно, исследование сложных многочастичных систем, подобных биологическим, требует больших вычислительных мощностей. Один из возможных путей для их обеспечения заключается в использовании в качестве активного элемента для хранения и передачи информации не заряда электрона, а его спина. В связи с этим проектирование новых устройств, использующих спиновые степени свободы, является одной из актуальных задач современной спинтроники.

В настоящей работе речь идёт о спиновом фильтре – устройстве, подобное которому по принципу функционирования обсуждалось, например, в работе [1].

Структура, на примере которой производится моделирование, – открытый квантовый билиард круглой формы или по сути квантовая точка с подведёнными к ней квазиодномерными каналами. Работа посвящена изучению транспорта сквозь такую открытую систему в присутствии спин-орбитального взаимодействия.

Ранее нами было обнаружено, что на зависимости проводимости от энергии носителей заряда в системе с билиардом вследствие спин-орбитального взаимодействия появляются дополнительные асимметричные резонансы типа известных резонансов Фано [2]. Следует отметить также, что проводимость системы при этом не зависит от спиновой поляризации входного состояния.

Новые результаты свидетельствуют о том, что в присутствии магнитного поля проводимость структуры становится зависимой от спиновой поляризации состояния во входном канале. Использование этого факта позволяет надлежащим подбором параметров системы реализовать спиновый фильтр, функционирующий на «нуле» и «единице» одного из упомянутых выше резонансов. Это в свою очередь открывает дополнительные возможности для манипулирования спиновыми степенями свободы носителей и, как следствие, для создания новых приборов спинтроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-02-00717).

1. J.F. Song, Y. Ochiai, J.P. Bird, Appl. Phys. Lett. **82**, 4561 (2003).
2. Г.Г. Исупова, А.И. Малышев, Письма в ЖЭТФ **94**, 597 (2011).

## ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИЯ В НАНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ ДОНОРАМИ

Н.В. Курова, В.А. Бурдов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: kurova\_natasha@mail.ru*

Исследование нанокристаллического кремния в последние годы стало весьма актуальным в связи с обнаружением довольно интенсивной фотолюминесценции в структурах на его основе, что может быть использовано при создании оптоэлектронных приборов. Как показывают результаты эксперимента, характерные значения скоростей излучательной рекомбинации в кремниевых кристаллитах оказываются на порядки меньше скоростей конкурирующих безызлучательных процессов, в частности, оже-рекомбинации, в связи с чем возникает необходимость модификации их электронной структуры с целью подавления подобных «паразитных» процессов.

Одним из методов воздействия на электронные состояния в нанокристаллах является допирование их различными примесями. В данной работе внимание сосредоточено на исследовании влияния доноров P, Li на электронную структуру нанокристаллов кремния и на скорости Оже-процесса. Рассмотрены кристаллиты диаметрами от 1 до 2 нм с одним примесным атомом в центре (P, Li), а также с несколькими атомами фосфора (с концентрацией 2%), равномерно распределенными по нанокристаллу. Оборванные связи на границе кристаллита были насыщены водородом. Расчет электронных и дырочных состояний нанокристалла проведен из первых принципов в рамках стационарной теории функционала плотности. Показано, что атом фосфора вносит более сильные искажения в электронную структуру кристаллита, чем литий, что связано с более сильным потенциалом центральной ячейки иона фосфора [1]. Введение в кристаллиты атома лития приводит к расщеплению основного состояния в зоне проводимости нанокристалла на синглет, дублет и триплет, расположение которых сохраняет инверсионную структуру, характерную для объемного кремния.

На основе полученных данных были рассчитаны скорости оже-рекомбинации для соответствующих размеров нанокристаллов кремния. Показано, что в «чистых» нанокластерах характерные скорости принимают значения  $10^9$ - $10^{11}$  с<sup>-1</sup>, а присутствие атома лития довольно слабо (менее, чем на порядок) меняет скорость оже-процесса. Наличие атома фосфора сильно сказывается (происходит усиление на 2-3 порядка) на скорости оже-рекомбинации, а присутствие нескольких доноров приводит к небольшому увеличению соответствующих значений по сравнению со скоростями в случае одного донора.

1. Н.В. Курова, В.А. Бурдов, ФТП **47** (12), 1604 (2013).

# ЭВОЛЮЦИЯ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ

В.Я. Демиховский, А.В. Тележников

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [telezhnikov@phys.unn.ru](mailto:telezhnikov@phys.unn.ru)*

Топологические изоляторы (ТИ) – новый класс веществ в физике конденсированного состояния с необычными свойствами: их энергетический спектр обладает поверхностными бесщелевыми состояниями, которые лежат в запрещенной зоне объемных состояний. Эти поверхностные состояния являются топологически защищенными: рассеяние назад на немагнитной примеси для электрона запрещено [1].

В настоящей работе исследуется эволюция локализованных волновых пакетов, сформированных на поверхности тонких пленок ТИ на примере  $Bi_2Se_3$ . Как показано в работе [2], в случае толщин пленок порядка десятков ангстрем перекрытие волновых функций стационарных состояний, принадлежащих противоположным поверхностям пленки, приводит к существенной перестройке энергетического спектра: в нем появляется щель. Как величина щели, так и ее знак (а также другие параметры эффективного гамильтониана) существенно зависят от толщины пленки.

Проведен расчет волновых функций и спиновой плотности волновых пакетов, имеющих различную начальную ориентацию спина, в произвольные моменты времени для различных параметров гамильтониана. Установлено, что наличие двух ветвей в спектре поверхностных состояний приводит к расщеплению первоначально локализованных волновых пакетов на две части, которые распространяются с различными групповыми скоростями. Кроме того, интерференция квантовых стационарных состояний волнового пакета, принадлежащих двум ветвям спектра, приводит к осцилляциям его центра – *zitterbewegung*. Исследована зависимость формы волнового пакета в произвольный момент времени от симметрии функции его начального состояния, а также ориентации спина. Так, в случае когда начальный волновой пакет имеет аксиально-симметричную волновую функцию и ориентацию спина, перпендикулярную поверхности пленки ТИ, во все моменты времени эта цилиндрическая симметрия сохраняется. В то же время, среднее значение проекции спиновой плотности на любое направление на поверхности пленки прецессирует. Форма волновых пакетов с произвольным направлением начальной ориентации спина имеет более сложную структуру.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-02-00784).

1. M.Z. Hasan, C.L. Kane, *Rev. Mod. Phys.*, **82**, 3045 (2010).
2. H.Z. Lu, W.Y. Shan, W. Yao et al., *Phys. Rev. B* **81**, 115407 (2010).

# ТУННЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КВАНТОВОЙ ЯМЫ ИЗ СМЕЖНОЙ КВАНТОВОЙ ЯМЫ ПРИ КОГЕРЕНТНОМ ПЛЕНЕНИИ НАСЕЛЕННОСТЕЙ

К.А. Баранцев, А.Н. Литвинов

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
Санкт-Петербург

E-mail: kostmann@yandex.ru

В последнее время эффект когерентного пленения населенностей (КПН) вызывает повышенный интерес исследователей. Суть этого эффекта заключается в возникновении специфической суперпозиции долгоживущих состояний в многоуровневой квантовой системе, взаимодействующей с двухчастотным когерентным (обычно лазерным) излучением. Это суперпозиционное состояние не взаимодействует с излучением. Исследования резонансов КПН проводились как теоретически [1], так и экспериментально в полупроводниковых квантовых ямах на основе InGaAs/AlInAs и GaAs [2].

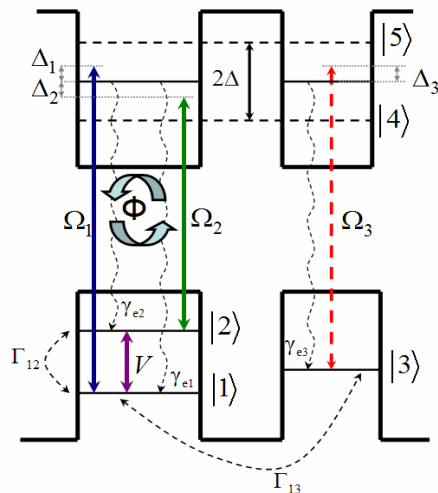


Рис.1 Двойные туннельно-связанные квантовые ямы.  $\Delta_i$  - отстройки полей,  $\Omega_i$ ,  $V$  - частоты Раби полей,  $2\Delta$  - туннельное расщепление.

В данной работе проводится исследование эффекта КПН в двойных туннельно-связанных квантовых ямах, взаимодействующих с лазерным излучением (частоты Раби  $\Omega_{1,2,3}$  на Рис.1). Поле инфракрасного диапазона  $V$  замыкает контур возбуждения ( $\Delta$ -схема). Обнаружено, что возможно управление оптическими свойствами одной квантовой ямы (справа на Рис.1) с помощью изменения относительной фазы  $\Phi$  полей, взаимодействующих с другой квантовой ямой (слева на Рис.1). Показано, что при сильных полях  $\Omega_{1,2}$  и  $V$  возникает расщепление Ауллера-Таунса уровней  $|4\rangle$  и  $|5\rangle$  на три подуровня. Энергией этих подуровней можно управлять изменяя фазу  $\Phi$ , что позволяет изменять поглощение и преломление

пробного поля  $\Omega_3$ .

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук МК-384.2013.2, Регионального общественного Фонда содействия отечественной науке, гранта компании British Petroleum, Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 14-02-31422 мол\_a), Государственного задания для ВУЗов 2014/184.

1. A.N. Litvinov, K.A. Barantsev, et. al, *Optics Communications*, **305**, 155-163 (2013).
2. M.C. Phillips, H. Wang, I. Romyantsev, et. al, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 183602 (2003).

# ВЛИЯНИЕ НЕУПОРЯДОЧЕННОСТИ НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА МУЛЬТИБАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА С ПРОСТРАНСТВЕННО МОДУЛИРОВАННОЙ ДИРАКОВСКОЙ ЩЕЛЬЮ

Е.С. Азарова, Г.М. Максимова

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [katia-azarova@yandex.ru](mailto:katia-azarova@yandex.ru)*

В последнее время активно ведется исследование электронных и транспортных свойств графена и различных структур на его основе [1 – 3]. Поскольку в условиях реального эксперимента параметры систем неизбежно испытывают флуктуации, представляет интерес изучение влияния беспорядка на транспортные свойства графеновых структур [см., например, 4, 5]. В настоящей работе анализируется электронный транспорт в неупорядоченной многобарьерной системе на основе графена с пространственно неоднородной дираковской щелью  $\Delta(x)$  и внешним кусочно-постоянным электростатическим потенциалом  $V(x)$ .

Нами рассмотрены флуктуации таких параметров, как внешний потенциал  $V$ , дираковская щель  $\Delta$  и барьерная ширина  $d$ . При этом в области каждого  $i$ -го барьера эти величины испытывают случайные отклонения от своих средних значений:

$$V_i = V(1 + \delta\varepsilon_i), \Delta_i = \Delta(1 + \delta\varepsilon_i), d_i = d(1 + \delta\varepsilon_i). \quad (1)$$

где  $\delta$  – параметр, определяющий силу беспорядка, и  $\varepsilon_i \in [-1, 1]$  – случайная величина. Расчеты показали, что в общем случае неупорядоченность приводит к уменьшению средних по реализациям коэффициента прохождения  $T$  и кондактанса  $G/G_0$  ( $N = 100$  – число реализаций). Показано, что при флуктуациях энергетических параметров с ростом  $\delta$  происходит монотонное уменьшение этих транспортных характеристик. Однако в геометрически неупорядоченных системах коэффициент прозрачности немонотонно зависит от интенсивности беспорядка, в частности, при определенных условиях можно наблюдать увеличение  $T$  с ростом  $\delta$ . Было установлено, что существует конечная величина кондактанса систем с флуктуирующей шириной барьера  $d$ . Согласно нашим и более ранним [4, 5] расчетам, увеличение длины (числа барьеров) неупорядоченной структуры с фиксированной силой беспорядка сопровождается уменьшением рассмотренных транспортных характеристик.

1. S. Das Sarma et al., Rev. Mod. Phys. **83**, 407 (2011).
2. A.H. Castro Neto et al., Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009).
3. E.S. Azarova, G.M. Maksimova, Physica E. **61**, 118 (2014).
4. Y.P. Bliokh et al., Phys. Rev. **79**, 075123 (2009).
5. N. Abedpour et al., Phys. Rev. **79**, 165412 (2009).

# ВЛИЯНИЕ МЕЖМИНИЗОННОГО ТУННЕЛИРОВАНИЯ НА ДИНАМИКУ ДОМЕНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

А.О. Сельский<sup>1,2</sup>, А.Г. Баланов<sup>3</sup>, А.А. Короновский<sup>1,2</sup>, О.И. Москаленко<sup>1,2</sup>,  
А.Е. Храмов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский государственный технический университет  
им. Ю.А. Гагарина, Саратов*

<sup>2</sup>*Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,  
Саратов*

<sup>3</sup>*Loughborough University, Loughborough, UK  
E-mail: [feanorberserk@mail.ru](mailto:feanorberserk@mail.ru)*

В качестве примера полупроводниковой наноструктуры в настоящей работе рассматривается полупроводниковая сверхрешетка. Модель транспорта электронов через сверхрешетку, вдоль проводящей минизоны, с приложенным продольным полем описана в [1]. В работе [2] показано, что в подобной структуре возможно наблюдать электронные домены. Более того, в присутствии наклонного магнитного поля динамика доменов в полупроводниковой сверхрешетке сильно усложняется, даже под действием температуры [3]. Как правило, расстояние между минизонами задается достаточно большим, чтобы можно было пренебречь межминизонным туннелированием Ландау-Зинера [2, 4]. Однако, при некоторых конфигурациях наноструктуры транспорт электронов через сверхрешетку может осуществляться исключительно за счет межминизонного туннелирования. Большой интерес может представлять случай смешанной модели транспорта, когда движение электронов вдоль проводящей минизоны сопровождается случаями туннелирования электронов между минизонами. Данная работа посвящена исследованию процессов в полупроводниковой сверхрешетке в вышеописанном случае смешанной модели транспорта электронов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-33071), Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-345.2013.2), программой поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-828.2014.2), Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания высшим учебным, а также фонда некоммерческих программ «Династия».

1. L. Esaki, R. Tsu, IBM J. Res. Develop. **14**, 61 (1970).
2. M. T. Greenaway, A. G. Balanov, E. Schöll et al., Phys. Rev. B. **80**, 205318 (2009).
3. A. O. Selskii, A. A. Koronovskii, A. E. Hramov et al., Phys. Rev. B. **84**, 235311 (2011).
4. D.P.A. Hardwick, S.L. Naylor, S. Bujkiewicz et al., Physica E. **32**, 285-288 (2006).



# МНОГОМОДОВЫЙ ТРАНСПОРТ В ВОЛНОВОДАХ СО СПИН-ОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

А.С. Козулин, А.И. Малышев

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [SashaKozulin@yandex.ru](mailto:SashaKozulin@yandex.ru)*

В последние годы активно исследуются физические системы, в которых совместно проявляются зарядовые и спиновые степени свободы. Проявляемый к ним интерес обусловлен, прежде всего, возможностью создания полупроводниковых устройств на основе спинтроники, а также их применением в квантовых вычислительных системах. В данной работе рассматривается транспорт двумерного электронного газа в бесконечном волноводе, имеющем неоднородность – область конечной длины со спин-орбитальным взаимодействием (СОВ) Рашба и Дрессельхауза (рис. 1). Подобные системы рассматривались ранее в других работах [1, 2].

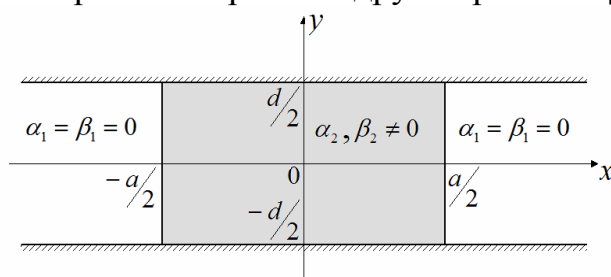


Рис 1. Геометрия модельной системы.

С использованием метода матрицы рассеяния [3, 4] при учете нескольких мод размерного квантования были проведены численные расчеты полного и спинзависимых кондактансов, спиновой поляризации, а также компонент спиновой плотности при различных значениях длины неоднородности и параметров Рашба и Дрессельхауза. На зависимостях кондактанса от энергии носителей обнаружены провалы типа резонансов Фано, возникающие при локализации волн в СОВ неоднородности вследствие формирования в ней эффективной потенциальной ямы. При этом число провалов кондактанса и значения энергии носителей, при которых они наблюдаются, определяются подобно уровням энергии в одномерной прямоугольной потенциальной яме.

Вариация длины неоднородности и параметров СОВ указывает на возможность управления спиновым состоянием «на выходе» из системы при наличии только одной делокализованной моды. Это позволяет рассматривать систему как модель простейшего устройства для манипуляций спиновым состоянием носителей.

1. L. Zhang, P. Brusheim, H.Q. Xu, Phys. Rev. B. **72**, 045347 (2005).
2. Xi Fu, Z. Chen, F. Zhong et al., Physica B. **405**, 4785 (2010).
3. H. Xu, Phys. Rev. B. **50**, 8469 (1994).
4. Y. K. Ko, J. C. Inkson, Phys. Rev. B. **38**, 9945 (1988).

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Benson T.M.	132
Furniss D.	132
Guizard S.	132
Huart T.	145
Kiisk V.	64
Lähderanta E.	141
Seddon A.B.	132
Sildos I.	64
Tatte T.	64
Абрамов А.С.	121
Аверкиев Н.С.	141, 143
Аветисов И.Х.	50, 81, 83, 133
Аветисов Р.И.	81, 133
Азарова Е.С.	167
Аккузина А.А.	81, 133
Алагашев Г.К.	69
Алексеев К.Н.	145, 159, 161
Алешкина С.С.	65
Алисин В.В.	86
Андреев В.В.	80
Антошкина С.А.	54
Анурова М.О.	89
Арбенина В.В.	57
Байдусь Н.В.	94
Баланов А.Г.	161, 162, 168
Балашов А.С.	58
Баранцев К.А.	166
Баранчиков А.Е.	49
Белов А.И.	43
Бескачко В.П.	53
Бирюков А.С.	69
Биткина О.Ю.	110
Бобков К.К.	67
Бобров А.И.	94

Болдырев К.Н.	82, 84
Борик М.А.	76, 86, 96
Бублик В.Т.	86, 96
Бубнов М.М.	65, 67
Бузаева М.В.	45, 51, 55, 59
Бунаков Н.А.	44, 59
Бурдов В.А.	164
Буфетова Г.А.	115
Ваганова Е.С.	51, 55
Ванецев А.С.	54
Великанов С.Д.	114, 125
Вельмискин В.В.	67, 70
Волкова Е.И.	94
Волкова Е.К.	31
Волкова Н.С.	129
Волкова Т.В.	76
Воронов В.В.	49, 56, 57, 62
Воронцов Д.А.	95
Воронцов К.В.	114
Воронько Ю.К.	120
Гавриш К.Г.	90
Гажулина А.П.	113
Гайтко О.М.	54
Галиев А.И.	111
Гарибин Е.А.	62
Гарюткин В.А.	114, 124, 125
Гельманова Т.О.	47, 112
Глушкин Е.В.	137
Горин Д.А.	27
Гортинская А.Д.	95
Горшков А.П.	129
Грачев Д.А.	42, 58, 60
Грибко В.В.	130
Григорькин А.А.	151
Гурьянов А.М.	61
Гурьянов А.Н.	65, 67

Гусев П.Е.	62
Давыдова О.А.	45, 51, 55, 59
Демиховский В.Я.	165
Денисенко М.В.	158, 160
Денисов С.А.	48
Дерен П.	84
Дианов Е.М.	67, 68, 70
Добрецова Е.А.	84
Дроздов Ю.Н.	48
Егоров А.С.	110
Егорова О.Н.	70
Елисеев В.В.	78
Еремейкин О.Н.	110
Ерин Д.Ю.	70
Ермаков Р.П.	56, 62
Ерофеев ДА.	85
Ершов А.В.	42, 58, 60
Жариков Е.В.	101
Жигунов Д.М.	46
Зайцев Р.В.	154
Заколдаев Р.А.	117
Захаров Н.Г.	114, 124, 125
Зверев П.Г.	128, 138
Золотовский И.О.	121
Иванов В.А.	135
Иванова В.Г.	138
Иванов В.К.	49
Иванов Ю.Л.	143
Ивлева Л.И.	128
Исупова Г.Г.	163
Исупова Е.А.	113
Исхакова Л.Д.	88
Каверин Б.С.	34
Казаков Б.Н.	136
Казанский П.Г.	47, 112
Казанцева А.А.	91

Калинин В.Н.	152
Калинин Е.Н.	152
Камынин В.А.	71
Карпунин В.В.	153
Кашайкин П.Ф.	68
Климин С.А.	82, 92
Климов Е.С.	34, 45, 51, 55, 59
Козлов Д.В.	44, 59
Козулин А.С.	169
Кокарев С.А.	92
Колядин А.Н.	69
Конюхова Ю.Г.	31
Кораблева С.Л.	126, 127, 137
Королев Д.С.	43
Короновский А.А.	161, 162, 168
Коростелин Ю.В.	114
Косолапов А.Ф.	69
Костюк Г.К.	117
Кочеткова К.В.	59
Кочубей В.И.	31
Крайнов И.В.	141
Красильник З.Ф.	48
Кревчик В.Д.	152, 154
Кревчик П.В.	154
Крючков С.В.	156
Кузнецов С.В.	49, 57, 62
Кузнецова Ю.В.	52, 91
Куклина Я.В.	93
Кулебякин А.В.	86, 96
Курков А.С.	71
Курова Н.В.	164
Кухарь Е.И.	156
Кхань Чан	83
Кяшкин В.М.	54
Лабутина М.Л.	134
Ларионов А.В.	114

Латухина Н.В.	46
Леонюк Н.И.	92
Липатьев А.С.	47, 112
Литвинов А.Н.	166
Лихачев М.Е.	65, 67
Ловчев А.В.	136
Ломонова Е.Е.	76, 86, 88, 96
Лотарев С.В.	47, 112
Лугинина А.А.	57
Луковкин А.Ю.	69
Лыков В.А.	131
Лыков П.А.	128
Ляпин А.А.	123
Макаров В.В.	161, 162
Максименко В.А.	161, 162
Максимова Г.М.	167
Малехонова Н.В.	94
Мальшев А.И.	163, 169
Маракулин А.В.	71
Маргулис В.А.	153
Марисов М.А.	116, 118, 126
Маркелов А.С.	130
Маркин А.В.	54
Мартыненко В.А.	78
Марычев М.О.	113
Матвеев С.А.	48
Маякова М.Н.	49, 62
Медведков О.И.	71
Мешков В.Е.	50
Милович Ф.О.	76, 86, 96
Минашина Л.А.	71
Михайлов А.Н.	43
Можевитина Е.Н.	83
Моисеев С.Г.	87
Москаленко О.И.	168
Муняев В.О.	160

Мухин А.В.	114, 124, 125
Мызина В.А.	76, 86, 88, 96
Наумов А.В.	20
Нежданов А.В.	48
Низаметдинов А.М.	51
Низамутдинов А.С.	116, 118
Никифоров А.Е.	82
Николаев Д.А.	115
Никулаева Н.А.	132
Нищев К.Н.	66, 68, 78, 102, 119
Новопольцев М.И.	78
Носкова А.Н.	
Нуждин Д.С.	131, 134, 135
Нуртдинова Л.А.	126
Объедков А.М.	34
Осико В.В.	102
Остаточников В.А.	87
Охримчук А.Г.	98
Павлов В.В.	127, 136
Павлов Д.А.	42, 93, 94
Панов А.А.	54, 55
Панов В.А.	88
Паняев И.С.	122
Петров П.В.	82, 143
Петрова О.Б.	89, 133
Пивкина М.Н.	115
Пирогов А.В.	42, 93
Подымало Д.К.	51
Позднякова О.Д.	155
Поминова Д.В.	49, 57
Попов П.А.	105
Попова М.Н.	74, 82, 85
Портнов В.Н.	95
Потапов С.Н.	44
Приймак Д.С.	159
Прямиков А.Д.	69

Путырский Д.С.	52
Пчелинцева Е.С.	59
Пыненков А.А.	66
Пятаев М.А.	145, 157, 159
Пятаев Н.А.	54
Рахимов Н.Ф.	116
Рахматуллин Р.М.	127
Ремпель А.А.	52, 91
Рожанский И.В.	141
Рожнова Ю.А.	57
Романова Е.А.	132
Романова Ю.Ю.	146
Рыбалтовский А.А.	67
Рябова А.В.	49, 57
Рябочкина П.А.	54, 76, 123, 137
Саввичев А.Т.	88
Савикин А.П.	110
Савинков В.И.	47
Садовникова Я.Э.	71
Садовский А.П.	50
Сайфутяров Р.Р.	133
Салганский М.Ю.	68
Санников Д.Г.	122
Сатанин А.М.	158, 160
Светухин В.В.	59
Севостьянова Т.С.	89
Сельский А.О.	168
Семашко В.В.	111, 116, 118, 127, 137
Семенов М.Б.	
Семёнов С.Л.	70, 154
Семенцов Д.И.	87, 121, 122
Сенаторов А.К.	70
Сергеев В.А.	45, 51
Сергеев М.М.	117
Серяков С.В.	96
Сигаев В.Н.	47, 112



Сидорова Н.В.	76
Симановский Д.В.	135
Смирнов А.Е.	43
Соболь А.А.	120
Созыкин С.А.	53
Сомов Н.В.	134
Сорокин Д.С.	94
Станиславчук Т.Н.	82
Старостина Е.С.	134
Степанова И.В.	90
Степихова М.В.	46, 48
Суровегина Е.А.	60
Сухарев В.А.	50
Табачкова Н.Ю.	76, 86, 96
Тарасенко С.А.	140
Тележников А.В.	165
Тетельбаум Д.И.	43
Тимошенко В.Ю.	46
Томашук А.Л.	68
Трушин В.Н.	130
Туданов Е.А.	124
Тютяев Е.В.	54
Ульянов С.Н.	157
Умников А.А.	67
Усламина М.А.	102, 119
Уцына Е.В.	129
Ушаков С.Н.	54, 76, 102, 119, 123, 137
Фаддеев М.А.	131, 135
Федоров П.П.	49, 56, 57, 62, 102, 123
Филатов Д.О.	154
Фирстов С.В.	66
Фролов И.В.	45
Фролов Ю.Н.	124, 125
Хвастунов Н.Н.	145
Хомяков А.В.	83, 89, 133
Храмов А.Е.	161, 162, 168

Цветков В.Б.	115
Чабушкин А.Н.	76
Чалков В.Ю.	48
Черноок С.Г.	70
Чернышев В.А.	82
Черторийский А.А.	51
Чукалина Е.П.	85
Чурляева О.Н.	86
Шавельев А.А.	118
Шахгильдян Г.Ю.	47
Шенгуров В.Г.	48
Шестакова И.А.	67
Шилова Г.В.	128, 138
Широков А.А.	45
Шнайдман С.А.	116
Шорохов А.В.	145, 155, 159
Шукшин В.Е.	120
Шушунов А.Н.	43
Яковлев Е.Б.	117
Яшков М.В.	65