

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. П. ОГАРЁВА
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ им. А. М. ПРОХОРОВА РАН»
ИНСТИТУТ ХИМИИ ВЫСОКОЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВ им. Г. Г. ДЕВЯТЫХ РАН

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

ПРОГРАММА И МАТЕРИАЛЫ
20-й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ

Саранск, 24–27 сентября 2024 г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Национальный
исследовательский
Мордовский
государственный
университет



КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ
ОПТИКА

Производство оптических компонентов



специальные
системы
ФОТОНИКА



ЛЛС

САРАНСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2024

УДК 537.533.3:621.3.049.77

ББК В3

М 341

Редакционная коллегия:

*Н. С. Аверкиев, К. Н. Ельцов, К. Н. Ницев, П. А. Рябочкина (отв. ред.),
С. А. Тарасенко, С. А. Хрущалина (отв. секр.)*

М 341 **Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение :** прогр. и материалы 20-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 24–27 сент. 2024 г. / редкол.: Н. С. Аверкиев [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2024. – 252 с.
ISBN 978-5-7103-4775-1

В сборник включены конспекты лекций и тезисы докладов 20-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.

Научное издание

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

**Программа и материалы
20-й Международной научной конференции-школы**

*Печатается в авторской редакции
в соответствии с представленным оригинал-макетом*

Подписано в печать 00.09.24. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 14,65. Тираж 120 экз. Заказ № 000.

Издательство Мордовского университета
Типография Издательства Мордовского университета
430005, г. Саранск, ул. Советская, 24

ISBN 978-5-7103-4775-1

© Коллектив авторов, 2024
© ФГБОУ ВО «МГУ
им. Н. П. Огарёва», 2024
© Оформление. Издательство
Мордовского университета, 2024

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УЧАСТНИКОВ

Конференция проводится Институтом наукоёмких технологий и новых материалов МГУ им. Н. П. Огарёва в период с 24 по 27 сентября 2024 года.

Программой конференции предусмотрены:

- обзорные доклады-лекции ведущих ученых по тематике конференции;
- выступления участников конференции с устными и стендовыми докладами.

Оргкомитетом установлена следующая продолжительность докладов: лекции – 45 мин., приглашенные доклады - 30 мин, устные сообщения – 15 мин.

Для демонстрации иллюстративных материалов лекторам и докладчикам будут предоставлены средства визуальной и компьютерной презентации. В последнем случае информация должна быть подготовлена в электронном виде с помощью Microsoft Power Point или в виде графических файлов: .jpg, .tif, .bmp.

Размеры щитов для размещения стендовых докладов – 90×120 см (ширина, высота).

РЕГИСТРАЦИЯ участников конференции будет проводиться 23 сентября с 15.00 до 18.00, 24 сентября с 8.00 до 12.00 в холле Института национальной культуры МГУ им. Н.П. Огарёва (г. Саранск, Полежаева, 44/3).

О времени прибытия в Саранск просим заблаговременно сообщить по электронной почте: vnksh.secretary@mrsu.ru или mnksh@yandex.ru. При наличии такой информации оргкомитетом будет организована встреча участников конференции по месту прибытия в любое время суток.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 430000, г. Саранск, ул. Большевистская, 68а,

МГУ им. Н. П. Огарёва, ИНТНМ

Тел./факс: (8342) 24-24-44

E-mail: mnksh@yandex.ru, vnksh.secretary@mrsu.ru

Хрущалина Светлана Александровна

<https://vnksh.mrsu.ru/>

**МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ
«МАТЕРИАЛЫ НАНО-, МИКРО-, ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ И ВОЛОКОННОЙ
ОПТИКИ: ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ»**

Саранск, 24–27 сентября 2024 г.

Сопредседатели конференции-школы:

И. А. Щербаков академик РАН, Научный руководитель Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН

М.Ф. Чурбанов – академик РАН, Научный руководитель Института химии высокочистых веществ РАН

Организационный комитет:

Д.Е. Глушко – ректор МГУ им. Н. П. Огарёва, председатель

К.Н. Нищев – директор ИФХ МГУ им. Н. П. Огарёва, заместитель председателя

С.А. Хрущалина – ученый секретарь

Программный комитет

П.А. Рябочкина – д.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия, председатель;

Н.С. Аверкиев – д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия;

М.В. Дорохин – д.ф.-м.н., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия;

К.Н. Ельцов – д.ф.-м.н., ИОФРАН, Москва, Россия;

Е.В. Жариков – д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия;

П.Г. Зверев – д.ф.-м.н., ИОФРАН, Москва, Россия;

А.М. Зюзин – д.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия;

Е.Е. Ломонова – д.т.н., ИОФРАН, Москва, Россия;

Г.Е. Малашкевич – д.ф.-м.н., Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Республики Беларусь, Минск, Беларусь;

К.Н. Нищев – к.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия;

М.Н. Попова – д.ф.-м.н., Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия;

В.В. Семашко – д.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия;

С.Л. Семенов – д.ф.-м.н., НЦВО им. Е.М. Дианова РАН, Москва, Россия;

Г.С. Соколовский – д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия;

С.А. Тарасенко – член-кор. РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия;

П.П. Федоров – д.х.н., ИОФРАН, Москва, Россия;

Е.В. Чупрунов – д.ф.-м.н., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия;

А.С. Cefalas – Ph.D., National Hellenic Research Foundation, Athens, Greece.

Рабочая группа

Т.В. Волкова	А.О. Арискин	А.С. Бикеев
И.Н. Евтеева	В.А. Кочешкова	Д.А. Скворцов
Е.Н. Лютова	А.Д. Таратынова	Н.О. Шабров
Е.П. Трямкина	Е.М. Бузаева	А.М. Жамков
Н.В. Моисеев	Д.А. Морозов	А.С. Алексеева

ПРОГРАММА-ГРАФИК КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ

24 сентября 2024, вторник

13:00–13:30	ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ <i>Д.Е. Глушко, ректор МГУ им. Н. П. Огарёва, председатель Организационного комитета</i>
13:30–15:45	ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ <i>Председатель: д.ф.-м.н., проф. П.А. Рябочкина</i>
13:30–14:15	Д.Р. Хохлов <i>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва</i> КИРАЛЬНАЯ НЕЛОКАЛЬНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФАЗЫ HgCdTe
14:15–15:00	С.А. Тарасенко <i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербурга</i> ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАКРУЧЕННЫХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР
15:00–15:45	А.М. Калашникова <i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербурга</i> ОПТОМАГНОНИКА
15:45–16:00	ПЕРЕРЫВ
16:00–18:15	ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ <i>Председатель: член-кор. РАН С.А. Тарасенко</i>
16:00–16:45	И.А. Буфетов <i>ИЦВО РАН, Москва</i> ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ С ПОЛОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ
16:45–17:30	Н.В. Никоноров <i>Университет ИТМО, С.-Петербурга</i> МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНЫЕ СТЕКЛА ДЛЯ ЗАДАЧ ФОТОНИКИ: ИСТОРИЯ, СВОЙСТВА, ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЯ
17:30–18:15	М.С. Дунаевский <i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербурга</i> СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ
18:30	ПРИВЕТСТВЕННЫЙ УЖИН

25 сентября 2024, среда

9:00–10:30	ЛЕКЦИИ Председатель: член-кор. РАН С.А. Тарасенко	
9:00–9:45	Н.С. Аверкиев ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург ГЛУБОКИЕ АКЦЕПТОРНЫЕ ПРИМЕСИ В GaAs	
9:45–10:30	В.В. Глушков Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ПОВЕРХНОСТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И КВАНТОВЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ В ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ И ПОЛУМЕТАЛЛАХ	
10:30–10:45	ПЕРЕРЫВ	
10:45–13:30	ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ	
	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ №1 ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ Председатель: д.ф.-м.н. проф. В.В. Семашко	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ №2 НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ Председатель: д.ф.-м.н., проф. М.Н. Попова
10:45–11:15	Г.Е. Малашкевич¹, В.В. Ковгар¹, Н.В. Варапай¹, Н.Т. Кхуен², К.Н. Нищев³ (приглашенный доклад) ¹ Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск ² Institute of Materials Science of the VAST, Hanoi ³ МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск ФОРМИРОВАНИЕ В КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ ОПТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ Er³⁺ С УШИРЕННОЙ ПОЛОСОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	О.Б. Петрова (приглашенный доклад) Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва НОВЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ И ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОТОНИКИ
11.15–11.45	П.Г. Зверев (приглашенный доклад) Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва КОМПАКТНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ С РЗЭ ИОНАМИ ВИДИМОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА	
1	А.А. Меленцова, О.А. Липина, А.Ю. Чуфаров, А.А. Тютюнник, В.Г. Зубков Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОЛИВИНА NaYGeO₄ ДОПИРОВАННОГО ИОНАМИ Tm³⁺, Ho³⁺	Ю.В. Спицына, А.С. Липатьев, С.И. Стопкин, Ю.В. Михайлов, С.С. Федотов, И.С. Глебов, В.Н. Сигаев Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОУПЛОТНЕНИЕ НАНОПОРИСТЫХ СТЕКОЛ

2	<p>А.Д. Шишкин^{1,2}, В.В. Семашко^{1,2} ¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань ²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань ЛАБОРАТОРНЫЙ МАКЕТ РАБОЧЕГО ЭТАЛОНА ПЕРВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ</p>	<p>П.В. Пестерева, Е.Ю. Кабыкина, А.Е. Львов, Л.В. Жукова Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМЫ $AgCl_{0,25}Br_{0,75}$ – TII</p>
3	<p>Ю.В. Жезучева¹, К.С. Серкина¹, И.В. Степанова¹, А.А. Елизеева¹, М.Т. Метлин² ¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва ²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва ВЛИЯНИЕ ИОНОВ ЭРБИЯ И ИТТЕРБИЯ НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ</p>	<p>Д. Бутенков¹, А. Василенкова¹, А. Бакаева¹, К. Рунина¹, К. Veselský^{2,3}, P. Loiko², A. Braud², P. Camy², O. Петрова¹ ¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва ² Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique (CIMAP), UMR 6252 CEA-CNRS-ENSICAEN, Université de Caen Normandie ³ Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University in Prague ОКСОХЛОРИДНЫЕ СВИНЦОВО-ТЕЛЛУРИТНЫЕ СТЁКЛА ЛЕГИРОВАННЫЕ Tm^{3+}, Ho^{3+}, Er^{3+} ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В ИК ФОТОНИКЕ</p>
4	<p>А.О. Арискин¹, Е.М. Бузаева¹, В.В. Осипов², Р.Н. Максимов², П.А. Рябочкина¹, В.А. Шитов² ¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ² Институт электрофизики УРО РАН СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИКИ $Y_2O_3:Tm, Ho$</p>	<p>А.В. Бакаева¹, Д.А. Бутенков¹, К.И. Рунина¹, А.В. Судьин², В.С. Царев³, С.Н. Ушаков^{2,3}, М.А. Усламина², А.А. Пыненко², О.Б. Петрова¹, И.Х. Аветисов¹ ¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва ²Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва СИНТЕЗ И СВОЙСТВА СТЁКОЛ В СИСТЕМЕ $PbCl_2-PbO-B_2O_3$, ЛЕГИРОВАННЫХ Nd^{3+}</p>

5	<p>В.С. Царев¹, А.Е. Левченко¹, Ю.В. Михайлов², А.С. Липатьев², А.Г. Охримчук² ¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева</p> <p>ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ НАНОСТРУКТУР В КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ</p>	<p>Е.Б. Желева^{1,2}, Ю.П. Бродниковский², А.А. Карабутов², В.М. Кяшкин³, О.А. Морозов^{1,2}, В.В. Семашко^{1,2}, А.А. Шавельев¹ ¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, ²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, Казань ³Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск</p> <p>КАЧЕСТВО КРИСТАЛЛОВ КОЛЬКВИРИИТА</p>
6	<p>А.М. Жамков, А.О. Арискин, П.А. Рябочкина Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск</p> <p>ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛЕ $Y_3Al_5O_{12}$: Er С ЛАЗЕРНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАКАЧКОЙ</p>	<p>Д.Д. Салимгареев, А.А. Южакова, А.Е. Львов, П.В. Пестерева, А.С. Корсаков, А.С. Шмыгалев, Л.В. Жукова Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург</p> <p>ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ AgCl – AgBr – AgI</p>
7	<p>А.Р. Шарафеев¹, В.В. Дорофеев¹, С.Е. Моторин^{1, 2}, А.К. Ким², С.В. Муравьев², М.Ю. Коптев², В.В. Колташев³ ¹ИХВВ им. Г. Г. Девятовых РАН, Нижний Новгород ²ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород ³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</p> <p>СВОЙСТВА СТЕКОЛ СЕРИИ TeO_2-ZnO-La_2O_3-Na_2O-Er_2O_3 С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ОКСИДА ЭРБИЯ</p>	
13:00–14:30	ПЕРЕРЫВ	
14:30–16:30	ЛЕКЦИИ	
	Председатель: д.ф.-м.н., проф. Н.С. Аверкиев	
14:30–15:15	<p>В.В. Семашко Казанский федеральный университет, Казань</p> <p>ОПТОАКУСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДЕФЕКТΟΣКОПИИ И МЕДИЦИНЕ</p>	
15:15–16:00	<p>М.Н. Попова Институт спектроскопии РАН (ИСАН), Москва</p> <p>ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ КРИОТЕРМОМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ С f- и d-ИОНАМИ</p>	
16:00–16:15	<p>Р.Р. Кашина АО «ЛЛС», Санкт-Петербург</p> <p>О РЕШЕНИИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СОВРЕМЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОПТИКИ И ФОТОНИКИ</p>	

16:15-16:30	<u>В.В. Муравьев</u> ООО «Специальные Системы. Фотоника», Санкт-Петербург, Москва ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР OMNIFLUO-990 ДЛЯ АНАЛИЗА НАНОМАТЕРИАЛОВ И СЦИНТИЛЛЯТОРОВ
16:30-16:45	ПЕРЕРЫВ

16:45–18:00	СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ
1	<p>С.А. Вильченко, В.В. Грибко Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород</p> <p>АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ EDTA НА ПАРАМЕТРЫ РОСТА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ KDP</p>
2	<p>А.А. Пахомова, К.С. Зараменских, М.С. Кузнецов, М.В. Морозов, С.М. Пилюшко, А.Р. Романенко АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Москва</p> <p>АЛМАЗНАЯ ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА КРИСТАЛЛОВ КРС-5</p>
3	<p>К.Г. Ким, К.А. Потапова, Е.Н. Воронина, С.С. Зыкова, Е.Н. Можевитина, И.Х. Аветисов Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ЖЕЛЕЗА В НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОМ ZnS ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ</p>
4	<p>В.М. Кондрашин Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург</p> <p>НОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ $TiBr_{0,46}I_{0,54} - AgCl$</p>
5	<p>П.В. Стрекалов, Е. В. Мягкова, К.И. Рунина, О.Б. Петрова Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва</p> <p>ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СИСТЕМЕ ФТОРИДА СВИНЦА С 8-ОКСИХИНОЛЯТОМ ЦИНКА, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ СООСАЖДЕНИЯ</p>
6	<p>А.Н. Бабкина, А.Л. Лосин, Р.Д. Харисова, К.С. Зырянова, В.А. Асеев, А.Д. Долгополов, М.М. Сергеев Университет ИТМО, Санкт-Петербург</p> <p>ВЛИЯНИЕ НАНО- И ФЕМТОСЕКУНДНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ $CSPbI_3$ В БОРОГЕРМАНАТНОМ СТЕКЛЕ</p>
7	<p>Д.А. Здоровейщев, Ю.А. Данилов, Е. И. Малышев Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЗОТА И ВИСМУТА НА СВОЙСТВА РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА $GaMnAs$</p>
8	<p>А.С. Шкапина, Р.Н. Крюков, Ю.А.Дудин, М.В. Дорохин, С.Ю. Зубков, А.В. Здоровейщев Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород</p> <p>ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ НА ОСНОВЕ $SiFe$</p>
9	<p>В.В. Ковзар^{1,2}, М.З. Зиятдинова³, Л.С. Плехова² ¹Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск ²Белорусский государственный университет, Минск ³Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва</p> <p>СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА Nd-СОДЕРЖАЩИХ ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКОЛ</p>
10	<p>Е. Ю. Кабыкина, П. В. Пестерева, Л. В. Жукова Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург</p> <p>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА МИКРОТВЕРДОСТИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ AGCL-KPC-5</p>

11	Д.А. Юшков, А.В. Ершов, Н.В. Байдусь, А.И. Белов, А.В. Здравейцев, Р.Н. Крюков Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОТЖИГА НА СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР СУБОКСИД КРЕМНИЯ/ОЛОВО
12	А.А. Чижова, Е.В. Зайцева, А.А. Конаков Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННОЙ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИТИПНЫХ МОДИФИКАЦИЙ SiSn
13	Р.М. Латыпов, С.А. Созыкин, В.П. Бескачко Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск ДЕФЕКТЫ В h-BN: РАСЧЕТЫ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ
14	К.С. Серкина¹, И.В. Степанова¹, А.В. Король¹, О.В. Князькова¹, Э.С. Сектаров², К.Н. Болдырев² ¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва ² Институт спектроскопии РАН, Троицк ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДОМ ТУЛИЯ
15	А.М. Титова¹, В.Г. Шенгуров¹, В.Ю. Чалков¹, А.А. Кудрин¹, Ю.Н. Бузынин² ¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород ² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород СУБМИКРОННЫЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СЛОИ GESN ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
16	С.К. Паймеров, А.И. Мурзашев Марийский государственный университет, Йошкар-Ола СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВ СИММЕТРИИ D5h
17	С.М. Пилюшко, М.С. Кузнецов, К.С. Зараменских, А.А. Пахомова, А.Р. Романенко, Г.В. Полякова, Л.Н. Бутвина АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Москва ГАЛОГЕНИДЫ СЕРЕБРА – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ВОЛОКОННОЙ ИК-ТЕХНИКИ
18	А.М. Гурьянов¹, С.А. Гурьянов² ¹ Самарский государственный технический университет, Самара ² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва КРЕМНИЕВЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРЫ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ ИЗ ОКСИДА СКАНДИЯ
19	П.В. Пестерева, Д.Д. Салимгареев, С.Е. Барыкина, Л.В. Жукова Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОДНОСЛОЙНЫХ ВОЛОКОН
20	Д.Д. Салимгареев, А.А. Южакова, А.Е. Львов, П.В. Пестерева, Ф.М. Кучеренко, Е.Ю. Кабыкина, Л.В. Жукова Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ КРИСТАЛЛИТОВ ИМИКРОНАПРЯЖДЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМ $AgCl_{0,25}Br_{0,75}$ – $TiBr_{0,46}I_{0,54}$ И $AgCl_{0,25}Br_{0,75}$ – $TiBr_{0,74}Br_{0,2}$

21	<p>А.Р. Шарафеев¹, В.В. Дорофеев^{1,2}, С.Е. Моторин^{1,2}, А.К. Ким², С.В. Муравьев², М.Ю. Коптев², В.В. Колташев³ ¹ИХВВ им. Г. Г. Десятых РАН, Нижний Новгород ²ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород ³ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва ЦИНК-ТЕЛЛУРИТНЫЕ СТЁКЛА ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ В ИК-ДИАПАЗОНЕ</p>
22	<p>А.М. Гурьянов¹, С.А. Гурьянов² ¹Самарский государственный технический университет, Самара ²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ БАРЬЕРЫ В КРЕМНИЕВЫХ МДП-СТРУКТУРАХ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ ОКСИДА СКАНДИЯ</p>
23	<p>А.В. Ширманкин, В.А. Камынин, А.И. Трикшев, А.А. Рыбалтовский, С.Е. Свечков, Б.И. Денкер, В.Б. Цветков ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ МОД В ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ С КОРОТКИМ РЕЗОНАТОРОМ</p>
24	<p>А.В. Ширманкин, В.А. Камынин, С.В. Кузнецов, В.А. Конюшкин, А.Н. Накладов, А.А. Александров, В.Б. Цветков ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТА КОНИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО – КРИСТАЛЛ ВаF₂:Yb:Er</p>
25	<p>А.С. Бикеев¹, М.В. Кременецкий², П.А. Рябочкина¹, Д.А. Скворцов¹, Н.О. Шабров¹ ¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва ²АО «ПО «Уральский оптико-механический завод имени Э.С. Яламова» РАЗРАБОТКА ВЛАГОСТОЙКИХ ВИЗУАЛИЗАТОРОВ В ОБЛАСТИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</p>

26 сентября 2024, четверг

9:00–10:30	ЛЕКЦИИ	
	<i>Председатель: д.ф.-м.н., проф. В.В. Семашко</i>	
9:00–9:45	В.В. Гудков <i>Уральский федеральный университет, Екатеринбург</i> НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИНАМИКА ЯН-ТЕЛЛЕРОВСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ДОПИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ	
9:45–10:30	М.В. Дорохин <i>Нижегородский государственных университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород</i> ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТОНКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЁНКАХ	
10:30–10:45	ПЕРЕРЫВ	
10:45–12:30	ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ	
	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ № 1 НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ <i>Председатель: к.ф.-м.н.</i> А.М. Калашникова	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ №2 НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ <i>Председатель: В. Панкратов</i>
10.45-11.15	Л.В. Котова, И.А. Елисеев, Б.Р. Бородин, А.И. Галимов, М.В. Дурнев, П.А. Алексеев, М.В. Рахлин (приглашенный доклад) <i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург</i> ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АТОМАРНО-ТОНКИХ СЛОЕВ InSe	
1	С.И. Стопкин, А.С. Липатьев, Ю.В. Михайлов, С.С. Федотов, И.С. Глебов, В.Н. Сигаев <i>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва</i> ЗАПИСЬ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СТРУКТУР С ВЫСОКИМ ЗНАЧЕНИЕМ ФАЗОВОГО СДВИГА В НАНОПОРИСТОМ СТЕКЛЕ	Е.М. Бузаева¹, Д.А. Агарков², М.А. Борик³, Г.М. Кораблева², А.В. Кулебякин³, И.Е. Курицина², В.М. Кяшкин¹, Е.Е. Ломонова³, Ф.О. Милович⁴, В.А. Мызина³, П.А. Рябочкина¹, Н.Ю. Табачкова^{3,4} ¹ <i>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск</i> ² <i>Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка</i> ³ <i>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</i> ⁴ <i>НИТУ МИСИС Москва</i> СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИК ZrO₂-Sc₂O₃-Yb₂O₃

2	<p>А.В. Дрозд¹, В.Е. Дрозд^{1,2}, В.Я. Кругликов¹, А.П. Барабан² ¹Северный Пресс, Санкт-Петербурга ²Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербурга ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ УЗЛОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ТЕХНОЛОГИЕЙ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ</p>	<p>С.А. Букарев¹, М.А. Борик², А.В. Кулебякин², Н.А. Ларина¹, Е.Е. Ломонова², Ф.О. Милович³, В.А. Мызина², В. Панкратов⁴, А.А. Реу¹, П.А. Рябочкина¹, Н.Ю. Табачкова³, Т.В. Волкова¹, А.М. Зюзин¹ ¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ³НИТУ МИСиС Москва ⁴Institute of Solid-State Physics, University of Latvia, Riga, Latvia ПРОЦЕСС БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В КРИСТАЛЛАХ ZrO₂ - Eu₂O₃</p>
3	<p>С.В. Гущин¹, С.В. Кузнецов², В.А. Конюшкин², А.Н. Накладов², А.А. Ляпин¹, В.Ю. Пройдакова², П.А. Рябочкина¹, П.П. Федоров² ¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ХАРАКТЕРИСТИКИ АП- КОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФТОРИДНЫХ ЛЮМИНОФОРОВ MF₂ (M = Ca, Sr), ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ Er³⁺, Ho³⁺</p>	
4	<p>Н.В. Варалай¹, Г.П. Шевченко², Ю.В. Бокшиц² ¹Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск ²НИИ физико-химических проблем БГУ, Минск ФОРМИРОВАНИЕ КОЛЛОИДНО- ХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ОДНОФАЗНОЙ МАТРИЦЫ КАК SrAl₂O₃ ОСНОВЫ ДЛЯ ЛЮМИНОФОРОВ</p>	
5	<p>А.С. Алексеева¹, В.М. Кяшкин¹, П.А. Рябочкина¹, Н.Ю. Табачкова², С.А. Хрущалина¹ ¹Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ²НИТУ МИСиС Москва СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИЦ Y₂O₃ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ</p>	

	КЕРАМИКИ	
12:30–14:00	ПЕРЕРЫВ	
14:00–15:30	ЛЕКЦИИ Председатель: д.ф.-м.н., проф. В.В. Гудков	
14:00–14:45	М.М. Глазов ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург ЭКСИТОНЫ В АТОМАРНЫХ ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ	
14:45–15:30	V. Pankratov Institute of Solid-State Physics, University of Latvia, Riga СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ АКТУАЛЬНЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ	
15:30–15:45	ПЕРЕРЫВ	
15:45–17:30	ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ	
	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ № 1 ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ Председатель: д.ф.-м.н., проф. Н.С. Аверкиев	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ № 2 ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ Председатель: д.ф.-м.н., проф. П.А. Рябочкина
16:15–16:45	В.Ю. Мыльников¹, С.О. Поташин¹, М.С. Ухтари², Ч.А. Доунг², Г.С. Соколовский¹, Н.С. Аверкиев¹ (приглашенный доклад) ¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия ² Эксетерский университет, Эксетер, Великобритания ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕРМАЛИЗАЦИЯ И КРИТИЧЕСКОЕ ЗАМЕДЛЕНИЕ В ДВУХ-ФОТОННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ	С.А. Хрущалина, П.А. Рябочкина, В.И. Шляпкина, С.Э. Кукаркина, Е.Э. Зимин, А.Д. Таратынова, М.В. Журавлев, А.А. Гадеева, В.С. Бобров, А.С. Алексеева (приглашенный доклад) Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦАХ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ РЗ-ИОНОВ И ЕГО ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ
16:45–17:15	И.Д. Авдеев¹, М.О. Нестоклон¹, С.В. Гупалов^{1,2} (приглашенный доклад) ¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург ² Jackson State University, Jackson, Mississippi, USA МЕЖДОЛИННОЕ СМЕШИВАНИЕ И ЭКСИТОНЫ В НАНОСТРУКТУРАХ ИЗ ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА	
17:15–17:45	К.Ю. Голеницкий (приглашенный доклад) ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург АНИЗОТРОПНЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОЛЯРИТОНЫ В ОДНООСНЫХ СРЕДАХ	

1	<p>А.А. Ревин, А.А. Конаков, Д.С. Королев Нижегородский национально-исследовательский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород</p> <p>ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА МАССИВОВ НАНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ГАЛЛИЯ</p>	<p>В.И. Колесникова¹, Г.С. Шакуров², О.А. Морозов^{1,2}, С.Л. Кораблева¹, В.В. Семашко^{1,2} ¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань ²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, Казань</p> <p>О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ Li₂NOF₄ В КАЧЕСТВЕ ВИЗУАЛИЗАТОРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ КВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ</p>
2		<p>А.Д. Таратынова, А.Н. Беляев, О.С. Бушукина, В.И. Давыдкин, П.А. Рябочкина, С.А. Хрущалина Национально-исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск</p> <p>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВЛК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН ВОЛН</p>
17:30–19:00		КУЛЬТУРНАЯ ПРОГРАММА

27 сентября 2024, пятница

9:00–10:15		ЛЕКЦИИ	
Председатель: д.ф.-м.н., П.Г. Зверев			
9:00–9:45	Ю.Г. Вайнер Институт спектроскопии РАН, Москва, Троицк Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва ОПТИЧЕСКАЯ УЛЬТРАМИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ВОДНЫХ СРЕДАХ ДЛЯ ЗАДАЧ БИМЕДИЦИНЫ		
9:45–10:30	Г.Ю. Шахгильдян Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва ФАЗОВЫЕ НАНОНЕОДНОРОДНОСТИ В ОКСИДНЫХ СТЕКЛАХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ		
10:30–10:45 ПЕРЕРЫВ			
10:45–13:15 ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ			
	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ № 1 ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА Председатель: к.ф.-м.н., доцент К.Н. Нищев	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ № 2 ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТНИКА Председатель: д.ф.-м.н., проф. П.А. Рябочкина	
10:45–11:15	М.В. Герасимов, К.В. Куреев, Е.Ю. Мардаев (приглашенный доклад) Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск РАДИОФОТОННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СПЕКТРАЛЬНО ЧИСТЫХ СВЧ-СИГНАЛОВ	Д.А. Тянякин (приглашенный доклад) АО «Оптиковолоконные Системы», Саранск ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РФ СОБСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРЕФОРМ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА	
11:15-11:45	Д.С. Липатов¹, А.А. Рыбалтовский², М.А. Мелькумов², С.С. Алешкина², М.М. Бубное², М.Е. Лихачев², А.Н. Абрамов¹, М.В. Яшков¹ (приглашенный доклад) ¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва ² Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ОКСИДА ИТТЕРБИЯ: РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ, ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ	А.О. Вознесенская, Я.В. Терло, А.В. Бахолдин (приглашенный доклад) Университет ИТМО, Санкт-Петербурге СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ОТОБРАЖЕНИЯ ЛУЧЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ ОПТИКИ	

11:45-12:15		<p>И.В. Фролов (приглашенный доклад) ООО «Саранскабель-Оптика», Саранск О ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ</p>
1	<p>А.А. Южакова, Д.Д. Салимгареев, А.Е. Львов, П.В. Пестерева, И.В. Южаков, Л.В. Жукова Уральский федеральный университет, Екатеринбург РАЗРАБОТКА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ С ОПТИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОЙ</p>	<p>А.В. Кривовичев, М.Ю. Власов АО «Инжиниринговый центр волоконной оптики», Саранск НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА</p>
2	<p>Д.И. Олейник¹, А.А. Умников¹, А.Н. Абрамов¹, А.С. Вахрушев², С.В. Алышев², А.М. Хегай², Е.Г. Фирстова², М.А. Мелькумов², С.В. Фирстов² ¹Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Десятых РАН, Нижний Новгород ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е. М. Дианова, Москва ВИСМУТОВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ ДЛЯ УСИЛИТЕЛЕЙ Е И S ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН С НАКАЧКОЙ ПО ОБОЛОЧКЕ</p>	<p>Т.В. Волкова¹, С.Г. Кострюков¹, М.В. Буралкин² ¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ²АО «Оптиковолокonné Системы», Саранск РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ АКРИЛАТНЫХ ПОКРЫТИЙ КВАРЦЕВЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ АО «ОПТИКОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ»</p>
3	<p>А.В. Судьин¹, С.Н. Ушаков^{1,2}, И.А. Волков¹, К.Н. Нищев¹, Н.А. Юдин¹, М.А. Усламина¹, М.Ю. Власов^{1,3} ¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ³Инжиниринговый центр волоконной оптики, Саранск РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ</p>	<p>А.В. Жаворонкин ООО «Кристаллическая оптика» ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ В ООО «КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ОПТИКА»</p>

4	<p>А.С. Абрамов, В.А. Лапин, П.П. Миронов Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы, Ульяновский государственный университет ДИНАМИКА ЧАСТОТНО МОДУЛИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АКТИВНОМ СВЕТОВОДЕ С ПРОДОЛЬНО МЕНЯЮЩЕЙСЯ ДИСПЕРСИЕЙ</p>	
5	<p>А.В. Елопов¹, К.Е. Рюмкин¹, Ф.В. Афанасьев², С.В. Альшеев¹, А.В. Харахордин¹, А.М. Хегай¹, Е.Г. Фирстова¹, С.В. Фирстов¹, М.А. Мелькумов¹ ¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва ²Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород СПЕКТРЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЗАВИСИМОГО УСИЛЕНИЯ В ФОСФОРСИЛИКАТНЫХ ВИСМУТОВЫХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ</p>	
6	<p>Д.Ф. Бурмистров Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород НИЗКОАПЕРТУРНЫЕ СВЕТОВОДЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ ВИСМУТОМ, ДЛЯ НАКАЧКИ ПО ПЕРВОЙ ОБОЛОЧКЕ</p>	
13:15–14:45	ПЕРЕРЫВ	
14:45	ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ. ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ	

Наноматериалы и нанотехнологии

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАКРУЧЕННЫХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР

Е.С. Вяткин, А.В. Пошакинский, С.А. Тарасенко
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: tarasenko@coherent.ioffe.ru

Представлены результаты исследования оптических свойств фотонных структур, состоящих из развернутых друг относительно друга слоев, диэлектрическая проницаемость каждого из которых модулирована периодическим образом в плоскости слоя. Такие структуры являются фотонными аналогами закрученных ван-дер-ваальсовых полупроводников [1]. Каждый изолированный слой обладает изотропным оптическим откликом. При сближении слоев возникает взаимодействие через ближние поля, что приводит к появлению оптической анизотропии. Варьируя расстояние между слоями и угол скручивания можно управлять оптическими характеристиками структуры [2].

Закрученные фотонные структуры являются киральными и демонстрируют естественную оптическую активность – способность вращать плоскость поляризации проходящего через них света. Кроме того, неполяризованный луч света, прошедший через такую структуру, приобретает частичную циркулярную поляризацию (спиновый угловой момент). В отраженном же луче возникает отличный от нуля орбитальный угловой момент, то есть свет становится закрученным [3]. Описан необычный механизм возникновения циркулярной поляризации в прошедшем пучке, связанный не с циркулярным дихроизмом, а с дифракцией света на муаре. Муар неизбежно возникает в закрученной структуре при наложении пространственной модуляции диэлектрической проницаемости слоев. Выполненные исследования показывают, что интенсивность дифракции на муаре различна для фотонов с противоположной циркулярной поляризацией. Дифрагированные на муаре лучи обладают значительной циркулярной поляризацией и орбитальным угловым моментом. Описываемые эффекты наиболее выражены на частотах собственных волноводных мод фотонной структуры.

1. A.V. Poshakinskiy, D.R. Kazanov, T.V. Shubina, et al, *Nanophotonics* **7**, 753 (2018).
2. B. Lou, N. Zhao, M. Minkov et al, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 136101 (2021).
3. Б.А. Князев, В.Г. Сербо, *УФН* **188**, 508 (2018).

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОТЖИГА НА СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР СУБОКСИД КРЕМНИЯ / ОЛОВО

Д.А. Юшков, А.В. Ершов, Н.В. Байдусь, А.И. Белов, А.В. Здравейщев,
Р.Н. Крюков

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

E-mail: Daniil-2002.0206@yandex.ru

Формирование многослойных наноструктур (МНС) SiO_x/Sn является актуальным из-за предположения о том, что напыленный слой олова повышает кристаллизацию нанокристаллов (НК) Si, тем самым увеличив интенсивность их фотолюминесценции (ФЛ) [1]. Комбинация быстрого термического отжига (БТО) и последующего трубчатого (статического – СТО) также способствует росту интенсивности ФЛ [2]. В докладе представлены результаты влияния БТО и СТО и пост-гидрогенизации на люминесцентные свойства многослойных структур $\alpha\text{-SiO}_x/\text{Sn}$ (или SnO_2).

Образцы МНС получали поочередным осаждением слоев SiO_x/Sn на подложку КДБ-20 (100) при температуре 120 °С. Методом испарения в вакууме. Были получены структуры с толщиной SiO_x – 20±1 нм, а толщина Sn варьировалась 1, 1.5, 3, 5 нм для разных серий. Также был получен образец отдельной пленки SiO_x с толщиной 70 нм. Образцы были отожжены в печи БТО при 900 °С в течение 3 мин – и в трубчатой печи при 900–1100 °С 60 мин (СТО). Были выполнены эксперименты по отжигу в молекулярном водороде при температуре 500 °С (гидрогенизация).

Полученные образцы исследовали методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на комплексе Multiprobe RM, фотолюминесценции (ФЛ) в диапазоне 650–1000 нм и ИК-спектроскопии.

Установлено, что отдельные пленки SiO_x ($x \approx 1.8$) после отжига в трубчатой печи при 1000–1100 °С проявляют интенсивную ФЛ при комнатной температуре, в области 750–850 нм, связанную с излучательной рекомбинацией в НК Si, формируемых после СТО. Формирование НК при такой термообработке подтвердилось из данных РФЭС и ИК спектроскопии. БТО, в комплексе с последующим статическим печным отжигом, увеличивает интенсивность ФЛ пленок SiO_x в 2 раза. Гидрогенизация образцов приводит к росту интенсивности ФЛ в 2 раза.

Обнаружено, что ведение прослоек олова или его диоксида в структуру МНС для всех вариантов условий отжига приводит к снижению интенсивности ФЛ в указанной спектральной полосе.

В докладе обсуждаются возможные причины данного эффекта.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание FSWR-2023-0035).

1. С. Ma, L. Bi, J.Y. Feng, J. Cryst. Growth. **305**, 30-35 (2007).
2. D. Hiller, S. Goetze, M. Zacharias, J. Appl. Phys. **109**, 054308(2011).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННОЙ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИТИПНЫХ МОДИФИКАЦИЙ SiSn

А.А. Чижова, Е.В. Зайцева, А.А. Конаков

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

E-mail: chizhova@phys.unn.ru

Модификации хорошо известных полупроводников (кремний, германий и др.) вызывают интерес в связи с поисками путей повышения их излучательных свойств. Есть теоретические [1,2] и экспериментальные [3] предпосылки считать, что некоторые полиморфные модификации полупроводниковых элементов способны обеспечить более эффективное возбуждение люминесценции по сравнению с алмазоподобной кубической фазой. Ранее нами в [4] показано, что ромбоэдрический кремний фазы 9R имеет значительно лучшие излучательные свойства в сравнении с кубическим кремнием 3C. Тем не менее, он не является прямозонным полупроводником. Поэтому далее нами были рассмотрены твердые растворы на основе кремния (в частности $\text{Si}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}$). Для более систематического исследования взаимосвязи между степенью гексагонализации элементарной ячейки кристалла и электронной структурой гексагональных фаз твердых растворов полупроводников IV группы нами с использованием метода эмпирического псевдопотенциала были проведены расчеты электронной структуры серии гексагональных и ромбоэдрических модификаций (2H, 4H, 6H, 9R, 15R, 21R).

На основании результатов расчетов были сделаны следующие выводы. Во-первых, все рассмотренные фазы SiSn являются непрямозонными. По всей видимости, небольшая доля примеси Sn в твердом растворе SiSn не оказывает существенного влияния на изменение зонной структуры, в сравнении с кремниевой. Минимум зоны проводимости сохраняется вблизи или в той же точке $M (\pi/a, 0, 0)$ на границе зоны Бриллюэна, как и в 9R-Si [5] во всех гексагональных фазах. Отметим, что в пределе кубической фазы точка M переходит в точку X , вблизи которой находится минимум зоны проводимости в 3C-SiSn.

Во-вторых, увеличение степени гексагональности элементарной ячейки приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны (непрямой). Общая тенденция заключается в том, что повышение степени гексагональности от нуля (3C-SiSn) до единицы (2H-SiSn) приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны. Аналогичная тенденция наблюдается и для прямой энергетической щели: уменьшение ширины прямой энергетической щели с увеличением степени гексагональности. Кроме того, разница между прямой и непрямой щелями оказывается меньше в случае большей степени гексагональности материала, т.е. гексагонализация в некотором роде приводит к выпрямлению зонной структуры материала.

Работа была выполнена при поддержке министерства науки и высшего образования РФ (госзадание FSWR-2023-0052).

1. C. Rodl, T. Sander, F. Bechstedt, et al., Phys. Rev. B. **92**, 045207 (2015).
2. C. Raffy, J. Furthmuller, F. Bechstedt, Phys. Rev. B. **66**, 234 (2002).
3. J. Bandet, B. Despaux, M. Caumont, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, 234(2002).
4. А.А. Чижова, А.П. Гажулина, К.Р. Мухаматчин и др., Нанопфизика и нанопэлектроника. Труды XXVII Международного симпозиума. **2**. Нижний Новгород: Изд-во ИПФ РАН, 2023. С 630.
5. А.А. Nikolskaya, D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov, et al., Appl. Phys. Lett. **113**, 182103 (2018).

ДЕФЕКТЫ В h -BN: РАСЧЕТЫ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

Р.М. Латыпов, С.А. Созыкин, В.П. Бескачко
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет), Челябинск
E-mail: latypovrm@susu.ru

Источник одиночных фотонов (ИОФ) является краеугольным компонентом устройств квантовой фотоники. В последнее время в качестве перспективных материалов для ИОФ рассматриваются двумерные материалы типа графена, ввиду их уникальных оптических и электронных свойств, а также возможности размещения таких ИОФ в интегральных схемах [1]. Существует немало теоретических моделей с описанием микроскопического строения и электронной структуры ИОФ [2,3], однако их справедливость пока экспериментально не проверена, за исключением того, что возможность генерации одиночных фотонов в таких материалах связана с присутствием комплексов точечных дефектов.

Гексагональный нитрид бора (h -BN) выделяется из 2D-материалов широкой запрещенной зоной (около 6.0 эВ [4]) и способностью генерировать однофотонное излучение при комнатной температуре в ультрафиолетовой и видимой частях спектра. В качестве потенциальных материалов для ИОФ были выбраны структуры h -BN, содержащие разные по строению и составу комплексы дефектов: 1) замещающий углерод + вакансия азота, 2) азотный антиузел + вакансия азота, 3) два замещающих атома кислорода + вакансия азота [5]. Модели этих структур изучались методами теории функционала электронной плотности, реализованными в пакете VASP, с использованием приближения обобщенных градиентов для обменно-корреляционного функционала. Расчеты показали, что в присутствии рассмотренных дефектов в запрещенной зоне h -BN возникают энергетические уровни, обеспечивающие возможность генерации одиночных фотонов. Следует отметить, что дефекты вида 2) и 3) имеют высокие энергии образования и в их фононных спектрах присутствуют отрицательные частоты. Это означает, что появление таких дефектов термодинамически маловероятно, и они, скорее всего, механически неустойчивы.

1. S. Michaelis de Vasconcellos, D. Wigger, U. Wurstbauer, et al., Phys. Status Solidi B, **259**, 2100566 (2022).
2. L. Weston, D. Wickramaratne, M. Mackoite, et al., Phys. Rev. B **97**, 214104 (2018)
3. C. Jara, T. Rauch, S. Botti, et al., J. Phys. Chem. A **125**, 1325-1335 (2021)
4. G. Cassabois, P. Valvin, B. Gil, Nat. Photonics **10**, 262-266 (2016)
5. S.A. Tawfik, S. Ali, M. Fronzi, et al., Nanoscale **9**, 13575-13582 (2017)

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДОМ ТУЛИЯ

К.С. Серкина¹, И.В. Степанова¹, А.В. Король¹, О.В. Князькова¹,
Э.С. Сектаров², К.Н. Болдырев²

¹*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Москва*

²*Институт спектроскопии РАН, Троицк
E-mail: serkina.k.s@mict.ru*

Висмутгерманатные стекла проявляют широкополосную люминесценцию в ближнем инфракрасном диапазоне, что позволяет рассматривать их в качестве перспективных сред для оптического усиления [1]. Источником данной люминесценции служат висмутовые активные центры (ВАЦ), обладающие сложной комплексной структурой, в основе которой лежат ионы висмута в низких степенях окисления [1]. Введение ионов Tm^{3+} в состав стекол способствует расширению спектрального диапазона люминесценции, поскольку индивидуальная ИК-люминесценция данных ионов находится на длинноволновой границе люминесценции висмутгерманатных стекол [2].

Целью настоящей работы являлось исследование спектрально-люминесцентных характеристик висмутгерманатных стекол, легированных оксидом тулия. Объектом исследования были стекла мольного состава $10Bi_2O_3-85GeO_2-5Na_2O$ и $95GeO_2-5Na_2O$ с добавлением 0,01–0,1 мол.% Tm_2O_3 сверх 100 %. Спектры оптического поглощения регистрировали на спектрофотометре JASCO V-770 в диапазоне 300–2700 нм. Спектры люминесценции записывали на ИК-Фурье-спектрометре IFS 125HR при возбуждении диодными лазерами с длинами волн 520 и 808 нм.

Спектры поглощения висмутсодержащих стекол содержат характерную для висмутовых активных центров широкую полосу в области 500 нм, интенсивность которой возрастает при добавлении Tm_2O_3 , что предположительно связано с увеличением количества ВАЦ и содержат полосы поглощения ионов Tm^{3+} на 685, 785, 1210 и 1670 нм, связанные с переходами ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_3$, ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$, ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_5$ и ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$, соответственно. Спектры поглощения стекол без висмута не имеют поглощения в области 500 нм.

Спектры люминесценции синтезированных стекол содержат полосы люминесценции в диапазоне 1000–2500 нм, ассоциированные с ВАЦ и Tm^{3+} в серии $10Bi_2O_3-85GeO_2-5Na_2O$ или только с Tm^{3+} в серии $95GeO_2-5Na_2O$. Сравнительный анализ показал, что в висмутсодержащих стеклах происходит обменное взаимодействие $ВАЦ \leftrightarrow Tm^{3+}$, направление которого зависит от длины волны возбуждения и концентрации активаторов.

1. M. Peng et. al., J. Phys.: Condens. Matter, **21**, 285106 (2009).
2. X. Song et. al., J Non-Cryst Solids, **557**, 120575 (2021).

СУБМИКРОННЫЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СЛОИ GeSn ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

А.М. Титова¹, В.Г. Шенгуров¹, В.Ю. Чалков¹, А.А. Кудрин¹,
Ю.Н. Бузынин²

¹*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород*

²*Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
E-mail: asya_titova95@mail.ru*

Поликристаллические слои GeSn с высокими транспортными параметрами, выращенные на диэлектрических подложках, привлекают внимание исследователей в связи с возможностью создания на их основе электронных устройств следующего поколения, таких как монолитные трехмерные интегральные схемы и жидкокристаллические дисплеи.

Основной проблемой при разработке МДП-транзистора на основе поликристаллического слоя является низкая подвижность носителей заряда.

В настоящее время ведутся активные исследования по разработке поликристаллических слоев новых материалов с более высокими электрофизическими параметрами. В частности, большой интерес вызывают пленки GeSn. Добавление Sn в решетку Ge приводит к меньшей эффективной массе и большей подвижности носителей по сравнению с Si и Ge.

В данной работе приведены результаты исследований процесса роста методом *HW CVD* структурных, морфологических и электрических свойств поликристаллических слоев GeSn, выращенных на диэлектрических подложках при низкой температуре (менее 300 °C).

В работе приведены данные о структурном совершенстве, морфологии поверхности и транспортных свойствах (подвижность носителей, проводимость) поликристаллических пленок GeSn.

Приведены результаты исследования закономерностей роста поликристаллических пленок GeSn на кремниевых подложках, покрытых слоем SiO₂. Указаны условия роста и *in situ* легирования в процессе *HW CVD* слоев с требуемыми высокими параметрами: подвижность носителей выше 100 см²/В·с.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-22-00156.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВ СИММЕТРИИ D_{5h}

А.И. Мурзашев, С.К. Паймеров

Марийский государственный университет, Йошкар-Ола

E-mail: paumerov@mail.ru

В работах [1, 2] были разработаны методы вычисления энергетического спектра (ЭС) фуллеренов и углеродных наносистем. В связи с тем, что не существует полностью апробированных и проверенных методов измерения ЭС, возникает вопрос о соответствии представлений и моделей, в рамках которых вычислены ЭС, физической реальности. Правильность моделей и представлений, на основе которых вычислены ЭС, можно проверить лишь путем сравнения физических величин и характеристик, вычисленных в рамках этих моделей, с экспериментальными данными. Наиболее распространенной характеристикой фуллеренов, измеряемой после их синтеза, является спектр оптического поглощения (СОП). Очевидно, СОП, если не рассматривать колебательные моды, напрямую формируется оптическими переходами между энергетическими уровнями. Зная правила отбора для этих переходов, можно смоделировать СОП, сравнение которого с экспериментальными данными позволит судить о правильности выбранной модели, на основе которой вычислен ЭС, что было сделано в работах [3, 4]. Кроме того, в ряде случаев такое сравнение может позволить идентифицировать синтезированный изомер в соответствии с Атласом фуллеренов [5]. Недостатком вышесказанного является тот факт, что нет полной ясности в понимании незыблемости правил отбора. Среди некоторых исследователей ходят суждения типа: *если переходы запрещены правилами отбора, то не обязательно, что эти переходы не имеют места в реальности*. Также в рамках описанного выше метода не удастся установить интенсивность того или иного перехода, что очевидным образом вызывает сомнения в достоверности кривых СОП, полученных указанным выше методом. Для решения этой задачи нами разработан метод вычисления СОП непосредственно методами квантовой теории поля. Для этой цели мы воспользовались известной формулой Р. Кубо для тензора оптической проводимости, опубликованной в работе [6], выражающей СОП через двухчастичную функцию Грина. В представленной нами работе смоделированы СОП изомеров фуллеренов симметрии D_{5h} с использованием правил отбора и по формуле Кубо. Сравнение теоретических кривых СОП вышеуказанных изомеров, полученных с помощью правил отбора и по формуле Кубо, с экспериментальными кривыми СОП, демонстрирует эквивалентность двух подходов (с применением правил отбора и по формуле Кубо) для изомеров вышеуказанной группы симметрий.

1. Г.И. Миронов, Физика твердого тела, **49** (3), 527 (2007).
2. А.И. Мурзашев, Т.Э. Назарова, Физика металлов и металловедение, **115** (7), 675 (2014).
3. А.И. Мурзашев, М.Ю. Кокурин, С.К. Паймеров, Оптика и спектроскопия, **128** (9), 1238 (2020).
4. А.И. Мурзашев, М.Ю. Кокурин, А.П. Жуманазаров и др., Оптика и спектроскопия, **130** (6), 979 (2022).
5. P.W. Fowler, D.E. Manolopoulos, *An Atlas of Fullerenes*, Oxford Univ. Press (1995).
6. R. Kubo, J. Phys. Soc. Jpn., **12** (6), 570 (1957).

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АТОМАРНО-ТОНКИХ СЛОЕВ INSE

Л.В. Котова¹, И.А. Елисеев¹, Б.Р. Бородин¹, А.И. Галимов¹, М.В. Дурнев¹,
П.А. Алексеев¹, М.В. Рахлин¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: kotova@mail.ioffe.ru

Активное развитие 2D-материалов привело к появлению нескольких классов слоистых материалов. Наиболее перспективными полупроводниками считаются дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) и монокалькогениды металлов III группы (М(III)X). ДПМ известны уникальными оптическими свойствами монослоев. В отличие от них, монослой М(III)X имеет непрямую запрещенную зону, которая с увеличением количества слоев переходит в прямую полосу [1]. Следует отметить, что трансформация зонной структуры носит не только количественный, но и качественный характер. Параболическая дисперсия, характерная для объемных М(III)X, в монослоях превращается в дисперсию «мексиканская шляпа» [2]. Этот тип дисперсии приводит ко многим уникальным свойствам [3]. Однако, несмотря на значительный прогресс в изучении свойств и использовании этих материалов, точное количество слоев М(III)X, при которых происходит переход ширины запрещенной зоны от не прямой к прямой, не определено. Монослой имеет непрямую запрещенную зону типа «мексиканской шляпы», а после толщины ~10 слоев она становится прямой зоной [4], однако точный момент перехода остается неизвестным.

Проведено экспериментальное исследование тонких слоев β -InSe для определения количества слоев InSe, при которых происходит переход к прямозонной структуре. Толщину исследуемых чешуек определяют с помощью атомно-силовой микроскопии. Использование низкотемпературной μ -ФЛ позволило обнаружить толщину, при которой возникает фотолюминесценция, связанная с прямым межзонным переходом. Работу выхода и визуализацию изменения электронных свойств наноструктур на основе InSe исследовали с помощью Кельвин-Зондовой микроскопии. Показано, что момент появления фотолюминесценции соответствует скачку работы выхода при толщине 8 слоев. Таким образом, экспериментально установлен момент трансформации запрещенной зоны, что дает важную информацию для изготовления устройств на основе InSe.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант 24-22-20059).

1. Y. Guo, J. Robertson, Phys. Rev. Materials. **1**(4), 044004 (2017).
2. V. Zolyomi, N. D. Drummond, V. I. Fal'ko, Phys. Rev. B **87** (19), 195403 (2013).
3. A. V. Lugovskoi, M. I. Katsnelson, A. N. Rudenko, Phys. Rev. Letters. **123** (17), 176401(2019).
4. D. V. Rybkovskiy, A. V. Osadchy, E. D. Obraztsova, Phys. Rev. B **90** (23), 235302 (2014).

ЗАПИСЬ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СТРУКТУР С ВЫСОКИМ ЗНАЧЕНИЕМ ФАЗОВОГО СДВИГА В НАНОПОРИСТОМ СТЕКЛЕ

С.И. Стопкин, А.С. Липатьев, Ю.В. Михайлов, С.С. Федотов, И.С. Глебов,
В.Н. Сигаев

Российский химико-технологический университет

им. Д.И. Менделеева, Москва

E-mail: stopkin.s.i@muctr.ru

Под действием сфокусированных фемтосекундных (ФС) лазерных импульсов в объеме кварцевого стекла могут быть сформированы периодические структуры (нанорешетки), которые обладают двулучепреломлением формы, зависящим от параметров лазерного пучка [1]. Для образования нанорешеток требуется значительное количество импульсов. Недавно было продемонстрировано более быстрое образование в кварцевом стекле других двулучепреломляющих наноструктур, которые, однако, имеют низкую величину фазового сдвига [1]. В данной работе изучены соотношения между скоростью записи и величиной фазового сдвига в нанопористом высококремнеземистом стекле (НПС) в условиях низкоапертурной фокусировки лазерного пучка.

Для записи в объеме НПС двулучепреломляющих пластин в виде однослойных площадок из параллельных линий размерами 300x300 мкм использовался ФС лазер Pharos SP, работающий на длине волны 1030 нм. Энергия импульса изменялась от 400 до 1800 нДж, длительность импульсов составляла 180 фс. Лазерный луч фокусировался асферической линзой с числовой апертурой 0,16. Скорость сканирования лазерным пучком изменялась от 1 до 100 мм/с. Фазовый сдвиг двулучепреломления измеряли с помощью микроскопа Olympus BX51 с совмещенным анализатором спектра YOKOGAWA AQ6370D по методике, описанной в работе [2].

Установлено, что величина фазового сдвига увеличивается с ростом энергии импульса и частоты повторения, а также с уменьшением скорости сканирования. Максимальное значение фазового сдвига составило 1190 нм (2.31 π рад) на длине волны 1030 нм. НПС в сравнении с кварцевым стеклом позволяет существенно уменьшить время записи, так как максимально достижимый фазовый сдвиг одного двулучепреломляющего слоя, записанного в кварцевом стекле, не превышает 300 нм при тех же условиях фокусировки ФС пучка.

В качестве демонстрации перспективности НПС для лазерной записи изготовлен конвертер линейной поляризации в радиальную для излучения с длиной волны 1030 нм, имеющий фазовый сдвиг в половину волны. Время записи конвертера диаметром 6 мм составило 2 ч, а пропускание конвертера - 88% (при пропускании исходного образца стекла 90%).

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-10231).

1. Y. Lei et al., Opt. Mater. Express **12**, 3327-3355 (2022).
2. A. Messaadi et al., J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Publ. **12**, 1-9 (2016).

ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ УЗЛОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ТЕХНОЛОГИЕЙ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

А.В. Дрозд¹, В.Е. Дрозд^{1,2}, В.Я. Кругликов¹, А.П. Барабан²

¹ Северный Пресс, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

E-mail: adroz93@mail.ru

Одной из актуальных задач в современной наноэлектронике является создание защитных слоев от внешних воздействующих факторов для узлов радиоэлектронной аппаратуры [1, 2]. Технология атомно-слоевого осаждения (АСО) позволяет формировать конформные, равномерные покрытия с точностью до долей нанометра, увеличивая эксплуатационные характеристики радиоэлектронной аппаратуры.

В данной работе в качестве узла радиоэлектронной аппаратуры использовалась керамическая плата на поликоре ВК-100 60x48x1 (Рис. 1).

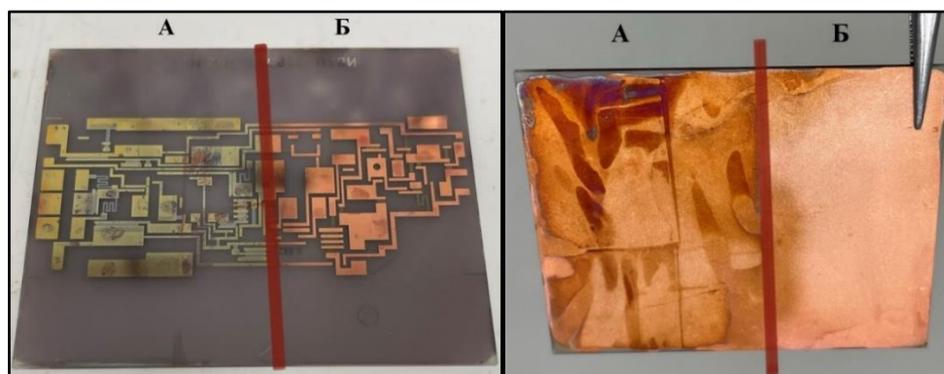


Рис. 1. Окисленная лицевая и экранная часть платы (А) и неокисленная лицевая и экранная часть платы с защитными слоями 30 нм Al_2O_3 (Б).

Оптимальный режим для нанесения защитных слоев оксида алюминия соответствовал температуре синтеза 200°C . В качестве прекурсоров были выбраны триметилалюминий и вода. Длительности импульсов напуска прекурсоров составили 0,2 с и длительности удаления избыточных продуктов реакции соответствовали 5 с, при этом было произведено 230 циклов повторных последовательных операций АСО для получения толщины защитного покрытия 30 нм. Данные защитные покрытия позволили предать плате антикоррозионные свойства, а также уменьшили потери в микрополосковой линии на порядок по сравнению с традиционной технологией защиты – лакированием и лужением припоем ПОС-61.

1. О. Симонов, Электроника, **8**, 162-167, 2016.

2. А.М. Слушков, В.Г. Малов, Патент РФ №2377266 «Защитное покрытие для печатных плат».

ХАРАКТЕРИСТИКИ АП-КОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФТОРИДНЫХ ЛЮМИНОФОРОВ MF₂ (M = Ca, Sr), ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ Er³⁺ И Ho³⁺

С.В. Гушин¹, С.В. Кузнецов², В.А. Конюшкин², А.Н. Накладов²,
А.А. Ляпин¹, В.Ю. Пройдакова², П.А. Рябочкина¹, П.П. Федоров²

¹Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: serg.guschin1703@gmail.com

Ап-конверсионные люминофоры, легированные редкоземельными (РЗ) ионами, являются главным объектом исследования у множества научных групп. Благодаря своим особым оптическим свойствам, они находят различное практическое применение [1, 2].

В настоящей работе объектами исследования являлись концентрационные серии фторидных монокристаллов и порошков со структурой флюорита MF₂-RF₃ (R³⁺ = Er³⁺, Ho³⁺). Монокристаллы были выращены методом вертикальной направленной кристаллизации (методом Бриджмена). Порошки были синтезированы методом осаждения из водных растворов.

Целью работы являлось сравнение характеристик ап-конверсионной люминесценции фторидных монокристаллов и порошков MF₂-RF₃ (R³⁺ = Er³⁺, Ho³⁺) при возбуждении ближним инфракрасным лазерным излучением. Монокристаллы представляют собой более контролируемую и четко определенную систему для фундаментальных исследований механизмов ап-конверсионной передачи энергии. Порошки же являются более сложным объектом исследования по сравнению с кристаллами из-за наличия ряда факторов. Во-первых, порошки имеют значительно большую площадь поверхности по сравнению с монокристаллами. Это приводит к более высокой концентрации поверхностных дефектов, действующих как ловушки для энергии возбуждения. Эти дефекты обеспечивают пути безызлучательной релаксации, что приводит к потере энергии в виде тепла. Во-вторых, рассеяние света более выражено в порошках из-за случайного расположения и различных размеров частиц. Это рассеяние уменьшает эффективную длину пути фотонов внутри материала, уменьшая вероятность поглощения фотонов и, в конечном итоге, снижая выход люминесценции. В-третьих, частицы порошка имеют тенденцию к агрегации, что еще больше усиливает эффект рассеяния. Однако несмотря на ряд ограничений, порошки предлагают преимущества с точки зрения простоты синтеза и экономической эффективности.

Таким образом, выбор между монокристаллами и порошками зависит от конкретных целей исследования и практического применения.

1. X. Liu, H. Chen, Y. Wang et al., Nat. Commun. **12**, 5662 (2021).
2. A. Ghazy, M. Safdar, M. Lastusaari et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells. **230**, 111234 (2021).

ФОРМИРОВАНИЕ КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
ОДНОФАЗНОЙ МАТРИЦЫ SrAl_2O_4
КАК ОСНОВЫ ДЛЯ ЛЮМИНОФОРОВ

Н.В. Варапай¹, Г.П. Шевченко², Ю.В. Бокшиц²

¹*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск*

²*НИИ физико-химических проблем БГУ, Минск*

E-mail: n.varapay@ifanbel.bas-net.by

Изучение соединений системы $\text{SrO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ представляет большой интерес ввиду того, что они обладают вязкими свойствами, могут служить фотолюминофорами, а также используются в качестве матриц для активных лазерных сред. В данной системе возможно формирование большого количества разных по составу фаз, а именно: $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, SrAl_2O_4 , SrAl_4O_7 , $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{Sr}_2\text{Al}_6\text{O}_{11}$, $\text{Sr}_7\text{Al}_{12}\text{O}_{25}$, $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}$, $\text{Sr}_{10}\text{Al}_6\text{O}_{19}$, $\text{Sr}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$. Моноклинный $\alpha\text{-SrAl}_2\text{O}_4$ является уникальным среди других алюминатов стронция тем, что он может проявлять люминесценцию под влиянием упругой деформации, что требуется для совершенствования опто-механических устройств [1].

Коллоидно-химический метод синтеза предполагает первоначально получение высокодисперсного прекурсора осаждением исходных реагентов подходящим осадителем, а затем его последующую термообработку [2]. Исследования показали, что для формирования однофазной матрицы SrAl_2O_4 необходимо проводить осаждение прекурсора водным раствором аммиака, используя ледяную баню (0°C) и двукратный избыток ионов Sr^{2+} (по отношению к стехиометрии $\text{SrO}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 1:1$), что связано с частичной растворимостью образуемого гидроксида стронция ($\text{Sr}(\text{OH})_2$) при комнатной температуре. Контроль pH в интервале 9,5 – 10 позволяет обеспечить количественное в соответствии со стехиометрией осаждение ионов Sr^{2+} из раствора. Термообработку прекурсора проводится на воздухе в два этапа: $900^\circ\text{C} - 2$ часа, затем $1500^\circ\text{C} 2$ часа.

Изучение данных рентгенофазового анализа образцов, синтезированных «традиционным» – твердофазным методом, а также образцов, полученных осаждением гидрокарбонатом аммония (NH_4HCO_3) исходных реагентов, взятых в стехиометрическом соотношении $\text{SrO}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 1:1$, и подвергшихся термообработке согласно предложенной выше схеме, показало наличие двух фаз: моноклинной SrAl_2O_4 и кубической $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$. В докладе будут рассмотрены преимущества однофазной матрицы SrAl_2O_4 , полученной по разработанной методике для синтеза люминофоров на основе SrAl_2O_4 : Ce^{3+} , Mn^{2+} .

1. Л.О. Козлова, журнал Неорганической химии, **68**, 12, 1722 (2023).
2. Ю.В. Бокшиц, журнал Белорусского государственного университета: Химия, **1**, 74 (2017).

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИЦ Y_2O_3 ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ

А.С. Алексеева¹, В.М. Кяшкин¹, П.А. Рябочкина¹, Н.Ю. Табачкова²,
С.А. Хрущалина¹

¹*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

²*НИТУ МИСИС, Москва*

E-mail: aleksandraalekseeva0203@mail.ru

Наночастицы оксида иттрия (Y_2O_3) представляют собой материал, который находит применение в создании лазерной керамики. Порошки прекурсоров должны обладать высокой химической и фазовой однородностью, а также монодисперсностью и малой степенью агломерации. Одним из методов синтеза порошков, удовлетворяющих данным требованиям, является химическое соосаждение [1]. Этот метод также отличают простота и относительно низкая стоимость. Важную роль в качестве получаемой керамики играет выбор исходных реагентов для синтеза прекурсоров, поскольку некоторые из них могут влиять как на оптическое качество, так и на спекание [1, 2].

В ходе настоящей работы методом химического соосаждения были синтезированы наночастицы Y_2O_3 с использованием различным исходных реагентов. В качестве таковых использовали нитрат и хлорид иттрия, осаждая их с помощью аммиака и гидроксида натрия. Были изучены морфология и фазовый состав полученных образцов.

Выявлено, что использование в качестве исходных реагентов нитрата иттрия и NaOH позволяет получить однофазные и монодисперсные частицы. Однако возможное присутствие ионов Na^+ может негативно сказаться на спекании порошков.

Замена исходных реагентов на хлорид иттрия и аммиак может приводить к образованию в порошке оксида иттрия примеси $YOCl$ и изменению морфологии частиц. Предложены причины появления примеси и способы предотвращения ее наличия.

1. М.С. Никова, А.А. Кравцов, И.С. Чикулина и др., Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, **19**, (2019).

2. Ni Meng, Fabrication of er-doped sesquioxide laser ceramics and their laser performance, Nanyang Technological University, Singapore, (2023).

РАЗРАБОТКА ВЛАГОСТОЙКИХ ВИЗУАЛИЗАТОРОВ В ОБЛАСТИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.С.Бикеев¹, М.В. Кременецкий², П.А.Рябочкина¹, Д.А. Скворцов¹,
Н.О. Шабров¹

¹*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

²*ПО «Уральский оптико-механический завод имени Э.С. Яламова»,*

г. Екатеринбург

e-mail: artem.bikeev.02@mail.ru

В настоящее время лазеры широко применяются для различных практических применений: лазерной сварке, наплавке пресс-форм, резке, маркировке, гравировке, закалке и термоупрочнению, спецприменениях. Для проведения работ с лазерными источниками требуется их юстировка и настройка, которая проводится при помощи визуализаторов лазерного излучения. Визуализаторы позволяют преобразовывать излучение ближнего ИК- и УФ-диапазонов непрерывных и импульсных лазеров в видимый спектральный диапазон, что облегчает юстировку оптических и лазерных систем, визуализацию невидимых пятен излучения от лазеров и регулировку профиля лазерных пятен.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов с визуализаторами, разработанными МГУ имени Н.П. Огарёва, для дальномеров, работающих на разных длинах волн 1,06 мкм, 1,54 мкм, 1,57 мкм.

Были проведены исследования визуализаторов, представляющие собой полимеры с добавлением порошков, полученных из твердых растворов $ZrO_2-Er_2O_3$ и порошков Y_2O_3 , полученных методом химического соосаждения.

Представлены результаты испытаний, в ходе которых определены следующие параметры визуализаторов: наличие люминесценции в видимой области спектра в темноте и на расстоянии 15 м при освещении излучением с освещенностью 300 лк, значение пороговой плотности энергии, необходимой для возбуждения люминесценции в видимой области спектра с интенсивностью, заметной невооруженным глазом.

Nanotechnology and nanomaterials

OPTICAL PROPERTIES OF TWISTED PHOTONIC STRUCTURES

E.S. Vyatkin, A.V. Poshakinskiy, S.A. Tarasenko

Ioffe Institute, St. Petersburg

E-mail: tarasenko@coherent.ioffe.ru

We discuss the optical properties of twisted photonic structures composed of dielectric layers with periodic in-plane modulation of the dielectric permittivity and stacked to each other with a twist. Such structures can be considered as photonic analogues of twisted van der Waals semiconductors [1]. Each isolated layer exhibits an isotropic optical response. When the layers approach each other, the electromagnetic interaction occurs through the near fields, which gives rise to optical anisotropy. By varying the distance between the layers and the twist angle, one can control the optical characteristics of the structure [2].

Twisted photonic structures are chiral and demonstrate natural optical activity, i.e., the ability to rotate the plane of polarization of light passing through them. In addition, an unpolarized beam of light passing through such a structure acquires partial circular polarization (spin angular momentum). In the reflected beam, a nonzero orbital angular momentum arises, i.e., the light becomes twisted [3]. We uncover an unusual mechanism of the emergence of circular polarization in the transmitted beam, which is caused by diffraction of light on the moiré pattern rather than by circular dichroism. The moiré pattern inevitably occurs in a twisted structure when the spatial modulation of the permittivity of the layers is superimposed. Our study shows that the intensity of moiré diffraction is different for the photons with opposite circular polarization. The moiré diffracted beams gain significant circular polarization and orbital angular momentum. The described effects are most pronounced at the frequencies of the photonic structure waveguide modes.

1. A.V. Poshakinskiy, D.R. Kazanov, T.V. Shubina et al, *Nanophotonics* **7**, 753 (2018).

2. B. Lou, N. Zhao, M. Minkov et al, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 136101 (2021).

3. B. A. Knyazev and V. G. Serbo, *Phys. Usp.* **61**, 449 (2018).

EFFECT OF ANNEALING CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF MULTILAYER SILICON SUBOXIDE/TIN NANOSTRUCTURES

D.A. Yushkov, A.V. Ershov, N.V. Baidus, A.I. Belov, A.V. Zdoroveyshchev,
R.N. Kryukov

N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

E-mail: Daniil-2002.0206@yandex.ru

The preparation of multilayer SiO_x/Sn nanostructures (MNSs) is relevant due to the assumption that the tin layer increases the crystallization of Si nanocrystals (NCs), so it increases the intensity of photoluminescence (PL) [1]. The combination of rapid thermal annealing (RTA) with subsequent tubular (static – STA) also contributes to an increase in the intensity of PL [2]. The report presents the results of the influence of RTA and STA and post-hydrogenation on the luminescent properties of multilayer a-SiO_x/Sn (or SnO₂) structures.

MNSs samples were prepared by alternating deposition of SiO_x/Sn layers on substrates of silicon wafer with resistivity 20 Ohm·cm. (100) at a temperature of 120 °C by vacuum evaporation. Structures with a thickness of SiO_x – 20±1 nm were prepared, and the thickness of Sn layers varied from ~ 1, 1.5, 3 and 5 nm. A sample of SiO_x film with a thickness of 70 nm was also produced. The samples were annealed in a RTA at 900 °C for 3 minutes and in a tubular furnace at 900-1100 °C for 60 minutes (STA). Experiments on annealing in molecular hydrogen at a temperature of 500 °C (hydrogenation) were performed.

The samples were examined by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) on Multiprobe RM, photoluminescence (PL) in the spectrum of 650-1000 nm and IR spectroscopy.

It was found that individual SiO_x films (x ≈ 1.8) after annealing in a tubular furnace at 1000–1100 °C exhibit intense PL at room temperature, in the range of 750–850 nm, associated with radiative recombination in Si NCs formed after STA. The formation of NCs during STA treatment was confirmed from the data of XPS and IR spectroscopy. RTA, with subsequent static furnace annealing, increases the PL intensity of SiO_x films by 2 times. Hydrogenation of the samples leads to a 2-fold increase in the intensity of PL.

It was found that the introduction of layers of tin or its dioxide into the multilayer nanostructure for all variants of annealing conditions leads to a decrease in the intensity of PL in the spectral band

The report discusses possible reasons for this effect.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment FSWR-2023-0035).

1. C. Ma, L. Bi, J.Y. Feng, *J. Cryst. Growth.* **305**, 30-35 (2007).

2. D. Hiller, S. Goetze, M. Zacharias, *J. Appl. Phys.* **109**, 054308 (2011).

THEORETICAL ANALYSIS OF ELECTRONIC BAND STRUCTURE VARIOUS POLYTYPIC MODIFICATIONS OF SiSn

A.A. Chizhova, E.V. Zaitseva, A.A. Konakov
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
E-mail: chizhova@phys.unn.ru

Modifications of well-known semiconductors (silicon, germanium, etc.) are of interest in connection with the search for ways to increase their emissive properties. There are theoretical [1, 2] and experimental [3] premises to believe that some polymorphic modifications of semiconductor elements can provide more efficient excitation of luminescence compared to the diamond-like cubic phase. Previously, we showed in [4] that rhombohedral silicon of the 9R phase has significantly better emissive properties in comparison with cubic silicon 3C. However, it is not a direct gap semiconductor. Therefore, we further considered solid solutions based on silicon (in particular, $\text{Si}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}$). For a more systematic study of the relationship between the degree of hexagonalization of the unit cell of a crystal and the electronic structure of the hexagonal phases of solid solutions of group IV semiconductors, using the empirical pseudopotential method, we calculated the electronic structure of a series of hexagonal and rhombohedral modifications (2H, 4H, 6H, 9R, 15R, 21R).

Based on the calculation results, the following conclusions were made. Firstly, all considered SiSn phases are indirect band gap. Apparently, a small fraction of Sn impurity in the SiSn solid solution does not have a significant effect on the change in the band structure, in comparison with silicon. The minimum of the conduction band remains near or at the same point M ($\pi/a, 0, 0$) on the boundary of the Brillouin zone, as in 9R-Si [5] in all hexagonal phases. Note that in the limit of the cubic phase, point M goes to point X, near which there is a minimum of the conduction band in 3C-SiSn.

Secondly, an increase in the degree of hexagonality of the unit cell leads to a decrease in the band gap (indirect). The general trend is that increasing the degree of hexagonality from zero (3C-SiSn) to one (2H-SiSn) leads to a decrease in the band gap. A similar trend is observed for the direct energy gap: a decrease in the width of the direct energy gap with increasing degree of hexagonality. In addition, the difference between direct and indirect slits turns out to be smaller in the case of a greater degree of hexagonality of the material, i.e. hexagonalization in some way leads to straightening of the band structure of the material.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment FSWR-2023-0052).

1. C. Rodl, T. Sander, F. Bechstedt, et al., Phys. Rev. B. **92**, 045207 (2015).
2. C. Raffy, J. Furthmuller, F. Bechstedt, Phys. Rev. B. **66**, 234 (2002).

3. J. Bandet, B. Despax, M. Caumont, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, 234(2002).

4. A.A. Chizhova, A.P. Gazhulina, K.R. Mukhamatchin, et al., Nanophysics and nanoelectronics. Proceedings of the XXVII International Symposium. T. 2. Nizhny Novgorod: Publishing House of the Institute of Applied Physics RAS, 2023. P. 630.

5. A.A. Nikolskaya, D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov, et al., Appl. Phys. Lett. **113**, 182103 (2018).

DEFECTS IN *h*-BN: FIRST PRINCIPLES SIMULATION

R.M. Latypov, S.A. Sozykin, V.P. Beskachko

South Ural State University (national research university), Chelyabinsk

E-mail: latypovrm@susu.ru

A single photon emitter (SPE) is a cornerstone component of quantum photonics devices. Recently, two-dimensional graphene-type materials have been considered as promising materials for SPE, due to their unique optical and electronic properties, as well as the possibility of placing such SPE in integrated circuits [1]. Many theoretical models describe the microscopic structure and electronic structure of SPE [2, 3], but their validity has not yet been experimentally verified, except that the possibility of generating single photons in such materials is associated with the presence of point defect complexes.

Hexagonal boron nitride (*h*-BN) stands out from 2D materials by a wide band gap (about 6.0 eV [4]) and the ability to generate single-photon emission at room temperature in the ultraviolet and visible spectrum. Structures of *h*-BN containing defect complexes of different structure and composition were selected as potential materials for SPE: 1) substitutional carbon + nitrogen vacancy, 2) nitrogen antisite + nitrogen vacancy, 3) two substitutional oxygen atoms + nitrogen vacancy [5]. The models of these structures were studied by methods of the density functional theory implemented in the VASP package using the generalized gradients approximation for the exchange-correlation functional. Calculations have shown the presence of the considered defects in *h*-BN produce energy levels in the band gap of *h*-BN, providing the possibility of generating single photons. It should be noted that defects of the types 2) and 3) have high formation energies and negative frequencies are present in their phonon spectra. This means that the appearance of these defects is thermodynamically questionable, and they are most likely mechanically unstable.

1. S. Michaelis de Vasconcellos, D. Wigger, U. Wurstbauer, et al., *Phys. Status Solidi B*, **259**, 2100566 (2022).

2. L. Weston, D. Wickramaratne, M. Mackoite, et al., *Phys. Rev. B* **97**, 214104 (2018)

3. C. Jara, T. Rauch, S. Botti, et al., *J. Phys. Chem. A* **125**, 1325-1335 (2021)

4. G. Cassabois, P. Valvin, B. Gil, *Nat. Photonics* **10**, 262-266 (2016)

5. S.A. Tawfik, S. Ali, M. Fronzi, et al., *Nanoscale* **9**, 13575-13582 (2017)

LUMINESCENT PROPERTIES OF BISMUTH GERMANATE GLASSES DOPED WITH THULIUM OXIDE

K.S. Serkina¹, I.V. Stepanova¹, A.V. Korol¹, O.V. Knyazkova¹,
E.S. Sectarov², K.N. Boldyrev²

¹*D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow*

²*Institute for Spectroscopy RAS, Troitsk*

E-mail: serkina.k.s@muctr.ru

Bismuth-germanate glasses exhibit broadband luminescence in the near-infrared range, which allows them to be considered as promising media for optical amplification [1]. The luminescence source is bismuth active centers (BACs), which have a complex structure based on bismuth ions in low oxidation states [1]. The Tm³⁺ ions introduction of into the glass composition helps to expand the spectral range of luminescence, since the individual IR luminescence of these ions is at the long-wavelength boundary of the luminescence of bismuth germanate glasses [2].

The purpose of this work was to study the spectral and luminescent characteristics of bismuth germanate glasses doped with thulium oxide. The object of the study was glasses with molar compositions 10Bi₂O₃-85GeO₂-5Na₂O and 95GeO₂-5Na₂O, which were doped with 0.01–0.1 mol.% Tm₂O₃ in excess of 100%. Optical absorption spectra were recorded on a JASCO V-770 spectrophotometer in the range of 300–2700 nm. Luminescence spectra were recorded on an IFS 125HR Fourier transform IR spectrometer when excited by 520 and 808 nm diode lasers.

The bismuth-containing glasses absorption spectra contain a broad band at 500 nm characteristic of bismuth active centers, the intensity of which increases with the addition of Tm₂O₃, which associated with an increase in the amount of BAC, and contains absorption bands of Tm³⁺ ions at 685, 785, 1210, and 1670 nm, associated with transitions ³H₆ → ³F₃, ³H₆ → ³H₄, ³H₆ → ³H₅, and ³H₆ → ³F₄, respectively. The non-bismuth-containing glasses absorption spectra have no absorption in the 500 nm region.

The synthesized glasses luminescence spectra contain luminescence bands in the range 1000–2500 nm, associated with BACs and Tm³⁺ for the 10Bi₂O₃-85GeO₂-5Na₂O series or only with Tm³⁺ for the 95GeO₂-5Na₂O series. A comparative analysis showed that the exchange interaction BAC ↔ Tm³⁺ occurs in bismuth-containing glasses, which direction depends on the excitation wavelength and the concentration of activators.

1. M. Peng et. al., J. Phys.: Condens. Matter, **21**, 285106 (2009).
2. X. Song et. al., J Non-Cryst Solids, **557**, 120575 (2021).

GESN SUBMICRON POLYCRYSTALLINE FILMS FOR MICROELECTRONICS

A.M. Titova¹, V.G. Shengurov¹, V.Y. Chalkov¹, A.A. Kudrin¹, Yu.N. Buzynin²

¹*Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Institute of Microstructure Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia*

E-mail: asya_titova95@mail.ru

Polycrystalline GeSn layers with high transport parameters grown on dielectric substrates attract the attention of researchers due to the possibility of creating next-generation electronic devices based on them, such as monolithic three-dimensional integrated circuits and liquid crystal displays.

The main problem in the development of a polycrystalline layer-based TIR transistor is the low mobility of charge carriers.

Currently, active research is underway to develop polycrystalline layers of new materials with higher electrophysical parameters. In particular, GeSn films are of great interest. The addition of Sn to the Ge lattice results in a lower effective mass and greater carrier mobility compared to Si and Ge.

This paper presents the results of studies of the growth process by the HW CVD method of the structural, morphological and electrical properties of polycrystalline GeSn layers grown on dielectric substrates at low temperature (less than 300 °C).

The paper presents data on the structural perfection, surface morphology and transport properties (carrier mobility, conductivity) of polycrystalline GeSn films.

The results of a study of the growth patterns of polycrystalline GeSn films on silicon substrates coated with a SiO₂ layer are presented. The conditions of growth and in situ doping in the process of HW CVD layers with the required high parameters are indicated: carrier mobility above 100 cm²/V·s.

The work was supported by the RNF grant No. 23-22-00156.

COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTICAL ABSORPTION SPECTRA OF FULLERENES OF SYMMETRY D_{5h}

A.I. Murzashev, S.K. Paymerov
Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia
E-mail: paymerov@mail.ru

In [1, 2], methods for calculating the energy spectrum (ES) of fullerenes and carbon nanosystems were developed. Due to the fact that there are no fully tested and proven methods for measuring ES, the question arises about the correspondence of representations and models within which ES are calculated to physical reality. The correctness of the models and representations on the basis of which the ES are calculated can be verified only by comparing the physical quantities and characteristics calculated within the framework of these models with experimental data.

The most common characteristic of fullerenes measured after their synthesis is the optical absorption spectrum (OAS). Obviously, OAS, if we do not consider vibrational modes, is directly formed by optical transitions between energy levels. Knowing the selection rules for these transitions, it is possible to model the OAS, comparison of which with experimental data will allow us to judge the correctness of the chosen model, on the basis of which the ES was calculated, which was done in [3, 4]. In addition, in some cases, such a comparison may make it possible to identify the synthesized isomer in accordance with the Atlas of Fullerenes [5].

The disadvantage of the above is the fact that there is no complete clarity in understanding the inviolability of the selection rules. Some researchers make judgments like: *if transitions are prohibited by the selection rules, then it is not necessary that these transitions do not take place in reality*. Also, within the framework of the method described above, it is not possible to determine the intensity of a particular transition, which obviously raises doubts about the reliability of the OAS curves obtained by the above method.

To solve this problem, we have developed a method for calculating the OAS directly by methods of quantum field theory. For this purpose, we used the well-known R. Kubo formula for the optical conductivity tensor, published in [6], expressing the OAS in terms of the two-particle Green function. In the work presented by us, the OAS of symmetry D_{5h} fullerene isomers is modeled using the selection rules and according to the Kubo formula. A comparison of the theoretical OAS curves of the above isomers obtained using the selection rules and the Kubo formula with the experimental OAS curves demonstrates the equivalence of the two approaches (using the selection rules and the Kubo formula) for isomers of the above group of symmetries.

1. G.I. Mironov, *Physics of the Solid State*, **49** (3), 527 (2007).
2. A.I. Murzashev, T.E. Nazarova, *Physics of Metals and Metallography*, **115** (7), 675 (2014).

3. A.I. Murzashev, M.Yu. Kokurin, S.K. Paymerov, *Optics and Spectroscopy*, **128** (9), 1238 (2020).
4. A.I. Murzashev, M.Yu. Kokurin, A.P. Zhumanazarov, et al., *Optics and Spectroscopy*, **130** (6), 979 (2022).
5. P.W. Fowler, D.E. Manolopoulos, *An Atlas of Fullerenes*, Oxford Univ. Press (1995).
6. R. Kubo, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **12** (6), 570 (1957).

INSE ATOMIC-THIN LAYERS LUMINESCENCE

L.V. Kotova, I.A. Eliseev, B.R. Borodin, A.I. Galimov, M.V. Durnev,
P.A. Alekseev, M.V. Rakhlin

Ioffe Institute, St. Petersburg
E-mail: kotova@mail.ioffe.ru

Active development of 2D materials has led to the emergence of several classes of layered materials. The most promising semiconductors are transition metal dichalcogenides (TMD) and monochalcogenides of group III metals (M(IIIA)X). TMDs are known for the unique optical properties of monolayers. In contrast, M(IIIA)X monolayers have an indirect band gap, which transforms into a direct band with an increase in the number of layers [1]. It should be noted that the transformation of the band structure is not only quantitative, but also qualitative. The parabolic dispersion characteristic of bulk M(IIIA)X transforms into a “Mexican hat” dispersion in monolayers [2]. This type of dispersion leads to many unique properties [3]. However, despite significant progress in the study of the properties and use of these materials, the exact number of M(IIIA)X layers at which the band gap width transitions from indirect to direct has not been determined. The monolayer has an indirect band gap of the “Mexican hat” type, and after a thickness of ~ 10 layers it becomes a direct band [4], but the exact moment of the transition remains unknown.

An experimental study of thin β -InSe layers was conducted to determine the number of InSe layers at which the transition to a direct-band structure occurs. The thickness of the studied flakes was determined using atomic force microscopy. The use of low-temperature μ -PL made it possible to detect the thickness at which photoluminescence associated with a direct interband transition occurs. The work function and visualization of changes in the electronic properties of InSe-based nanostructures were studied using Kelvin Probe Microscopy. It was shown that the moment of photoluminescence appearance corresponds to a jump in the work function at a thickness of 8 layers. Thus, the moment of band gap transformation was experimentally established, which provides important information for the manufacture of InSe-based devices.

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant 24-22-20059).

1. Y. Guo, J. Robertson, *Phys. Rev. Materials*. **1**(4), 044004 (2017).
2. V. Zolyomi, N. D. Drummond, V. I. Fal'Ko, *Phys. Rev. B* **87** (19), 195403 (2013).
3. A. V. Lugovskoi, M. I. Katsnelson, A. N. Rudenko, *Phys. Rev. Letters*. **123** (17), 176401(2019).
4. D. V. Rybkovskiy, A. V. Osadchy, E. D. Obraztsova, *Phys. Rev. B* **90** (23), 235302 (2014).

LASER INSCRIPTION OF HIGH RETARDANCE BIREFRINGENT STRUCTURES IN NANOPOROUS GLASS

S.I. Stopkin, A.S. Lipatiev, Yu.V. Mikhailov, S.S. Fedotov, I.S. Glebov,
V.N. Sigaev

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

E-mail: stopkin.s.i@muctr.ru

Periodic structures (nanogratings) can be formed in the volume of fused silica under the irradiation of focused femtosecond laser pulses, which have a form birefringence that depends on the parameters of the laser beam [1]. A significant number of pulses is required to form nanogratings. Recently, other birefringent nanostructures have been demonstrated to form more rapidly in silica glass, but these nanostructures have a low retardance [1]. In this work, the relationship between the inscription speed and the retardance value in nanoporous high-silica glass (NPG) by low-aperture focusing of the laser beam is studied.

To inscribe birefringent plates in the form of single-layer squares consisting of parallel lines with dimensions of 300x300 μm , a femtosecond laser Pharos SP operating at a wavelength of 1030 nm was used. The pulse energy was varied from 400 to 1800 nJ, while the pulse duration was 180 fs. The laser beam was focused by an aspheric lens with a numerical aperture of 0,16. The scanning speed of the laser beam varied from 1 to 100 mm/s. The phase shift was measured using an Olympus BX51 microscope combined with a YOKOGAWA AQ6370D spectrum analyzer according to the method described in [2].

It was found that the value of the phase shift increases with increasing pulse energy and repetition rate, as well as with decreasing scanning speed. The maximum value of the phase shift was 1190 nm (2.31π rad) at a wavelength of 1030 nm. NPG, in comparison with fused silica, allows a significant reduction in writing time, since the maximum achievable retardance of one birefringent layer inscribed in fused silica does not exceed 300 nm under the same focusing conditions of the femtosecond beam.

As a demonstration of NPG's perspectives for laser writing, a linear-to-radial polarization converter with a working wavelength of 1030 nm and a retardance of half a wave was fabricated. The inscription time of a converter with a diameter of 6 mm was 2 hours, and the transmittance of the converter was 88% (the transmittance of the original glass sample was 90%).

The work was supported by Russian Science Foundation (grant 22-79-10231).

1. Y. Lei et al., *Opt. Mater. Express* **12**, 3327-3355 (2022).
2. A. Messaadi et al., *J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Publ.* **12**, 1-9 (2016).

PROTECTIVE COATINGS FOR RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT COMPONENTS USING THE ATOMIC LAYER DEPOSITION TECHNOLOGY

A.V. Drozd¹, V.E. Drozd^{1,2}, V.Y. Kruglikov¹, A.P. Baraban²

¹ *Severniiy Press, Saint-Petersburg, Russia*

² *Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

E-mail: adrozd93@mail.ru

One of the urgent tasks in modern nanoelectronics is the creation of protective layers from external influencing factors for electronic equipment components [1, 2]. The Atomic Layer Deposition (ALD) technology makes it possible to form conformal, uniform coatings with an accuracy of fractions of a nanometer, increasing the performance characteristics of electronic equipment.

In this work, the ceramic plate made of alumina ceramics VK-100 60x48x1 was used as a unit of radio-electronic equipment (Fig. 1).

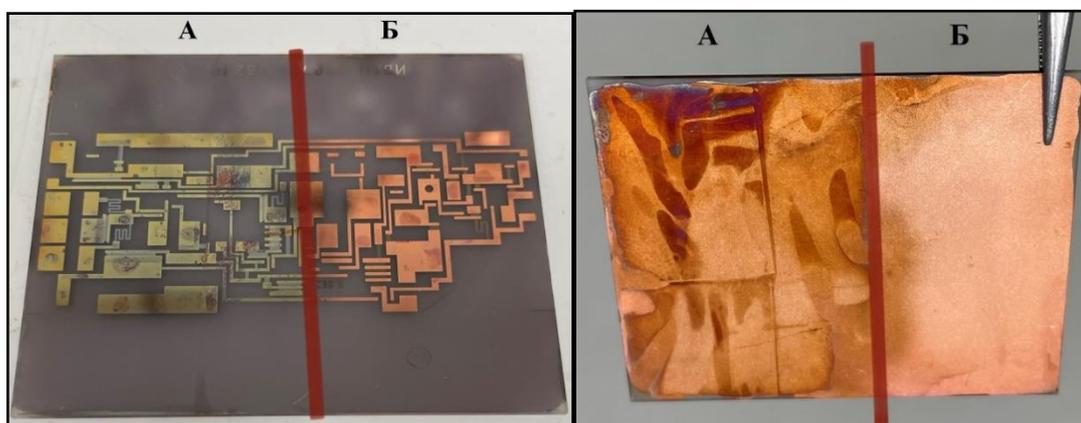


Fig. 1. Oxidized front and screen parts of the ceramic plate (A) and non-oxidized front and screen parts of the ceramic plate with protective layers of 30 nm Al_2O_3 (B).

The optimal mode for applying protective layers of aluminum oxide corresponded to a synthesis temperature of 200°C. Trimethylaluminum and water were chosen as precursors. The duration of the precursor injection pulses was 0.2 s and the duration of removal of excess reaction products was 5 s, while 230 cycles of repeated sequential ALD operations were performed to obtain a protective coating thickness of 30 nm. These protective coatings made it possible to impart anti-corrosion properties to the ceramic plate, and also reduced losses in the microstrip line by an order of magnitude compared to traditional protection technology - varnishing and tinning with POS-61 solder.

1. O. Simonov, *Electronics*, **8**, 162-167 (2016).

2. A.M. Slushkov, V.G. Malov, RF Patent No. 2377266 “Protective coating for printed circuit boards”.

CHARACTERISTICS OF UP-CONVERSION LUMINESCENCE
OF FLUORIDE PHOSPHORS MF_2 ($\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}$) DOPED RARE EARTH
IONS Er^{3+} AND Ho^{3+}

S.V. Gushchin¹, S.V. Kuznetsov², V.A. Konyushkin², A.N. Nakladov²,
A.A. Lyapin¹, V.Yu. Proydakova², P.A. Ryabochkina¹, P.P. Fedorov²

¹ National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk

² Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow

E-mail: serg.guschin1703@gmail.com

Up-conversion phosphors doped with rare-earth (RE) ions are the main object of study for many scientific groups. Because of their special optical properties, they have found various practical applications [1, 2].

In the present paper, we have investigated concentration series of fluoride single crystals and powders with a fluorite structure $\text{MF}_2\text{-RF}_3$ ($\text{R}^{3+} = \text{Er}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$). Single crystals were grown by vertical directional crystallization (Bridgman method). Powders were synthesized by using a co-precipitation from an aqueous nitrate solution technique.

The aim of work is comparison of up-conversion luminescence characteristics of fluoride single crystals and powders $\text{MF}_2\text{-RF}_3$ ($\text{R}^{3+} = \text{Er}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$) upon excitation near-infrared laser radiation. Single crystals provide a more controlled and well-defined system for fundamental studies of mechanisms of upconversion energy transfer. Powders are a more complex object of investigate compared to crystals due to the presence of a number of factors. Firstly, powders have a significantly larger surface area compared to single crystals. This leads to a higher concentration of surface defects, acting as traps for excitation energy. These defects provide non-radiative relaxation pathways, resulting in energy loss as heat. Secondly, light scattering is more pronounced in powders due to the random arrangement and varying sizes of particles. This scattering reduces the effective path length of photons within the material, decreasing the probability of photon absorption and ultimately lowering luminescence output. Thirdly, powder particles tend to agglomerate, further increasing scattering effects. However, despite a number of restrictions, powders offer advantages in terms of ease of synthesis and cost-effectiveness.

In summary, the choice between crystals and powders depends on the specific research goals and practical application.

1. X. Liu, H. Chen, Y. Wang et al., Nat. Commun. **12**, 5662 (2021).
2. A. Ghazy, M. Safdar, M. Lastusaari et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells. **230**, 111234 (2021).

FORMATION BY COLLOID-CHEMICAL METHOD OF A SINGLE-PHASE MATRIX SrAl_2O_4 AS A BASIS FOR LUMINOPHORES

N.V. Varapay¹, G.P. Shevchenko², Yu.V. Bokshits²

¹ *Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk*

² *Research Institute for Physical Chemical Problems BSU, Minsk*

E-mail: n.varapay@ifanbel.bas-net.by

The study of compounds of the $\text{SrO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ system is of great interest due to the fact that they have binding properties, can serve as photoluminophores, and are also used as matrices for active laser media. In this system, the formation of a large number of phases of different composition is possible, namely: $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, SrAl_2O_4 , SrAl_4O_7 , $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{Sr}_2\text{Al}_6\text{O}_{11}$, $\text{Sr}_7\text{Al}_{12}\text{O}_{25}$, $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}$, $\text{Sr}_{10}\text{Al}_6\text{O}_{19}$, $\text{Sr}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$. Monoclinic α - SrAl_2O_4 is unique among other strontium aluminates in that it can exhibit luminescence under elastic deformation, which is required for improving optomechanical devices [1].

The colloidal-chemical synthesis involves initially obtaining a highly dispersed precursor by precipitation of the starting reagents with a suitable precipitant, and then its subsequent heat treatment [2]. Research has shown that to form a single-phase SrAl_2O_4 matrix, it is necessary to precipitate the precursor with an aqueous ammonia solution using an ice bath (0°C) and a twofold excess of Sr^{2+} ions (relative to the stoichiometry $\text{SrO}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 1:1$), which is associated with partial solubility strontium hydroxide ($\text{Sr}(\text{OH})_2$) formed at room temperature. Controlling the pH in the range of 9.5 – 10 allows for quantitative in accordance with the stoichiometry precipitation of Sr^{2+} ions from solution. Heat treatment of the precursor is carried out in air in two stages: 900°C for 2 hours, then 1500°C for 2 hours.

A study of X-ray diffraction analysis data for samples synthesized by the “traditional” solid-phase method, as well as samples obtained by precipitation with ammonium bicarbonate (NH_4HCO_3) of the starting reagents, taken in the stoichiometric ratio $\text{SrO}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 1:1$, and subjected to heat treatment according to the scheme proposed above, showed the presence two phases: monoclinic SrAl_2O_4 and cubic $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$. The report will discuss the advantages of a single-phase SrAl_2O_4 matrix obtained using the developed method for the synthesis of phosphors based on SrAl_2O_4 : Ce^{3+} , Mn^{2+} .

1. L.O. Kozlova, *Journal of Inorganic Chemistry*, **68**, 12, 1722 (2023).
2. Yu.V. Bokshits, *Journal of the Belarusian State University*, **1**, 74 (2017).

SYNTHESIS AND CHARACTERISTICS OF Y₂O₃ NANOPARTICLES FOR THE PREPARATION OF LASER CERAMICS

A.S. Alekseeva¹, V.M. Kyashkin¹, P.A. Ryabochkina¹, N.Y. Tabachkova²,
S.A. Khrushchalina¹

¹ *National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk*

² *NUST MISiS, Moscow*

E-mail: aleksandraalekseeva0203@mail.ru

Yttrium oxide (Y₂O₃) nanoparticles are a material that finds application in the creation of laser ceramics. Precursor powders should have high chemical and phase homogeneity, also monodispersity and a low degree of agglomeration. One of the methods for the synthesis of powders that meet these conditions, is the chemical coprecipitation [1]. This method is also characterized by ease and low cost. The choice of starting reagents for the synthesis of precursors plays an important role in the quality of the ceramics obtained, because some of them can affect the optical quality and sintering [1, 2].

In the process of this work, Y₂O₃ nanoparticles were synthesized by chemical coprecipitation using various initial reagents. As such, yttrium nitrate and chloride were used, precipitating them with ammonia and sodium hydroxide. The morphology and phase composition of the obtained samples were studied.

It has been found that the use of yttrium nitrate and NaOH as starting reagents makes it possible to obtain single-phase and monodisperse particles. However, the possible presence of Na⁺ ions may have a negative effect on the sintering of powders.

The replacement of the starting reagents with yttrium chloride and ammonia can lead to the formation of YOCl impurities in the yttrium oxide powder and a change in the morphology of the particles. The reasons for the appearance of an impurity and ways to prevent its presence are proposed.

1. М.С. Никова, А.А. Кравцов, И.С. Чикулина, и др. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, **19**, (2019).

2. Ni Meng, Fabrication of er-doped sesquioxide laser ceramics and their laser performance, Nanyang Technological University, Singapore, (2023).

Волоконная оптика

только твердое тело, все преимущества волоконных лазеров были закрыты для такого большого класса активных сред, который составляют атомарные и молекулярные газы, способные выступать в роли лазерной среды.

Ситуация коренным образом изменилась после создания в 1999 году группой проф. Рассела (университет г. Бат, Англия) первых волоконных световодов с полый сердцевинной (СПС). Всего 3 года спустя был продемонстрирован первый волоконный рамановский лазер на водороде, заполняющем полую сердцевину световода [1]. Здесь для усиления света в полем световоде с газовым заполнением использовался один из нелинейных эффектов (вынужденное рамановское рассеяние).

Первый газовый волоконный лазер (ГВЛ) с оптической накачкой, работающий на основе инверсии населенностей, был продемонстрирован в 2010 году [2,3]. Лазерная генерация наблюдалась на двух длинах волн около 3.1 мкм в полем световоде, сердцевина которого была заполнена ацетиленом при относительно низком давлении 9.3 мбар. Источником накачки служил оптический параметрический генератор, импульсное (5 нс) излучение которого прецизионно перестраивалось по длине волны в спектральной области около 1.52 мкм для точного попадания в узкие (< 1 ГГц) линии поглощения активного газа.

Эффективность лазерной генерации в первом ГВЛ на ацетилене составляла всего около 1 % [Ошибка! Закладка не определена.]. В то время как энергия импульсов накачки достигала 1 мкДж, выходные импульсы на длине волны 3.1 мкм имели энергию 6 нДж и длительность ~ 4 нс. Низкая эффективность была обусловлена высоким уровнем оптических потерь (~ 20 дБ/м) на длине волны генерации в полем световоде, длина которого составляла 1.65 м.

Снижение оптических потерь в полем световоде до 5 дБ/м на длине волны 3.1 мкм позволило увеличить эффективность генерации наносекундных ацетиленовых ГВЛ до 27 %, что близко к теоретическому пределу эффективности для таких лазеров [4].

Но характеристики ГВЛ с оптической накачкой ограничиваются предельными характеристиками лазера накачки. Для того, чтобы в полной мере реализовать возможности полых световодов (устойчивость к высокоинтенсивному излучению, широкий спектральный диапазон пропускания и т.д.) в полностью волоконных оптических схемах, необходимо решить задачу генерации лазерного излучения непосредственно в СПС, не используя в качестве источника накачки другие волоконные лазеры на световодах с твердотельной сердцевинной с присущими им ограничениями. Одним из возможных подходов к решению данной задачи является создание газоразрядных волоконных лазеров (ГРВЛ) на волоконных световодах с полый сердцевинной, и которые (правда, на световодах в виде капилляров) рассматривались теоретически еще в 1964 году [5].

Газоразрядные лазеры в настоящее время хорошо известны и широко применяются в научной и технической деятельности (например, гелий-неоновый лазер и лазер на углекислом газе). Конструкция волноводного газоразрядного лазера (но еще не в волоконном исполнении) была впервые реализована в 1971 году в виде гелий-неонового лазера на 633 нм [6], в 1972 году в виде CO₂ лазера [7]. Отметим также демонстрацию волноводного гелий-неонового лазера на 3.39 мкм в 1975 году [6]. Во всех этих случаях в качестве волновода для генерируемого излучения использовался стеклянный капилляр с внутренним диаметром 3.3 мм [7], 430 мкм [6**Ошибка! Закладка не определена.**] и 510 мкм [8**Ошибка! Закладка не определена.**]. Уменьшение диаметра волновода способствует снижению изгибных оптических потерь в нем. Кроме того, уменьшение диаметра разрядной трубки обычно приводит к росту оптического усиления в плазме газового разряда. Но уже при внутреннем диаметре капилляров около 0.5 мм исследователи столкнулись с неустойчивостью электрического разряда в них, а при дальнейшем уменьшении диаметра капилляра поддержание разряда становится крайне проблематичным вследствие больших потерь электронов из разряда из-за их ухода на стенки капилляра. В ряде работ этот эффект преодолевался применением комбинированной электрической накачки. Так, накачка в виде сочетания постоянного напряжения и напряжения радиочастотного диапазона использовалась в [6] и в виде сочетания постоянного и СВЧ напряжения в [8]. В итоге волноводные газовые лазеры на капиллярных жестких волноводах применяются и в настоящее время, но использование в них капилляров в качестве волноводов и связанное с этим требование прямолинейности волновода (для обеспечения низкого уровня оптических потерь [5]) ограничивает их длину обычно несколькими десятками сантиметров.

Изучение возможностей создания волоконных газоразрядных лазеров начались около 15 лет тому назад, вскоре после создания волоконных световодов с полый сердцевинной. Основной проблемой здесь является сложность поддержания плазмы в тонкой (диаметром порядка 100 мкм) сердцевине. Такой порядок величины диаметра сердцевины используется практически во всех исследованиях СПС и определяется требованием приемлемого уровня изгибных оптических потерь СПС. Первые исследования на пути к ГРВЛ были выполнены в Политехническом университете Гонконга в 2007-2008 г [9]. В этих работах разряд в СПС возбуждался постоянным напряжением величиной ~ 10 кВ как в капиллярах из стекла, так и в СПС с различными значениями внутреннего диаметра (для капилляров) и диаметра полый сердцевины (для СПС). С точки зрения возбуждения электрического разряда различия между обычным капилляром и СПС с одинаковыми отверстиями в таком случае не существенны. Следует также отметить, что обычный стеклянный капилляр с внутренним диаметром порядка 1 мм в какой-то степени может

рассматриваться и как световод с полый сердцевинной, но с высокими изгибными потерями (как это было показано в [5]). В этих работах удалось продемонстрировать зажигание и поддержание разряда в стеклянных капиллярах и СПС с внутренним диаметром $d_C = 344, 250, 150, 50$ и даже 20 мкм в Ar, He и CO₂ при давлениях порядка 20 торр. Длины отрезков световодов между электродами были очень короткими и составляли от 13 до 2.9 см. При использовании более высоких напряжений (~30 кВ) разряд удалось возбудить в отрезке волоконного световода с внутренним диаметром 250 мкм и длиной 26 см [11].

Следующая серия работ по исследованию создания ГРВЛ с возбуждением электрического разряда постоянным напряжением была выполнена в университете г. Бата (Великобритания) [12–15]. Уже в 2014 году появилось сообщение о получении оптического усиления в плазме электрического разряда в полном волоконном световоде [12]. Для накачки использовался электрический разряд постоянного тока с напряжением до 40 кВ. Использовалась He-Xe смесь в соотношении 5:1 при полном давлении ~10 торр. Диаметр полый сердцевинной СПС револьверного типа (подробную информацию о световодах револьверного типа, в настоящее время являющемся наиболее распространенным в мире типом световодов с полый сердцевинной, можно найти в обзоре [15]) составлял $d_C = 120$ мкм. При добавлении 100% отражающего зеркала с одной стороны световода, на выходе с другой стороны световода уровень люминесценции возрастал более, чем в 2 раза, что интерпретировалось авторами как усиление излучения на переходе в атоме Хе. Усиление было зарегистрировано таким образом на переходах нейтральных атомов ксенона на длинах волн 3.11, 3.37 и 3.51 мкм. Но ГРВЛ созданы не были, и данный результат до настоящего времени не получил дальнейшего развития.

Наконец, в ряде работ, выполненных группой профессора Бенабида (Benabid) в университете г. Лимож (Франция) исследовались возможности возбуждения электрического разряда в полых волоконных световодах с помощью электромагнитных волн СВЧ диапазона (см. обзор [17]). Действительно, по ряду параметров схемы газовых лазеров с возбуждением СВЧ разрядом могут иметь существенное преимущество по сравнению с возбуждением постоянным напряжением или полями высокой частоты (ВЧ) [18]. В работах группы Бенабида была показана возможность зажигания и поддержания электрического разряда в полном световоде с сердцевинной $d_C = 125$ мкм, заполненной аргоном [19] под действием источника СВЧ поля с частотой 2.45 ГГц и мощностью около 200 Вт. Разряд поддерживался в сердцевине световода за счет возбуждения поверхностной электромагнитной волны, распространяющейся вдоль плазменного столба, заполняющего сердцевину СПС. Поверхностная электромагнитная волна формировалась с помощью специального устройства – surfatron-а [17], содержащего резонатор для СВЧ излучения. Как было продемонстрировано ранее [19], подобное устройство способно

эффективно возбуждать СВЧ-разряд в трубках большого диаметра (~ 1 см). Протяженность области в СПС, занятой плазмой разряда в световоде, была ограничена величиной ~ 4 см. Давление аргона составляло порядка 1 торр. Получить оптическое усиление в таком устройстве до настоящего времени не удалось, но предлагалось использовать его в качестве источника УФ излучения.

Анализ вышеупомянутых работ позволяет сделать следующие выводы. Применение постоянного напряжения для возбуждения электрического разряда в СПС с диаметрами полый сердцевинны порядка 100 мкм требует высоких значений напряжения (порядка десятков кВ), что существенно ограничивает возможности применения подобных устройств. Кроме того, использование постоянного напряжения сопровождается необходимостью расположения электродов внутри газового объема ГРВЛ, что повышает вероятность нарушения световодных свойств полый сердцевинны световода частицами, формирующимися при деградации электродов в процессе работы.

Применение полей ВЧ диапазона позволяет обойтись без электродов, но в остальном мало отличается от постоянного тока [21]. Кроме того, генерация необходимых значений напряженности поля в ВЧ диапазоне представляет существенно большие трудности, чем при постоянном напряжении или в диапазоне СВЧ.

Применение же для поддержания разряда электромагнитных волн в диапазоне СВЧ, в частности на частоте порядка 3 ГГц приводит к тому, что амплитуда колебаний электронов в поле становится порядка или меньше диаметра полый сердцевинны, что снижает вероятность гибели электронов на стенках световода по сравнению с полями более низких частот. Кроме того, широкое использование магнетронов, работающих на частоте 2.45 ГГц, в бытовой технике (в широко распространенных микроволновых печах) сделало источники такого излучения сравнительно дешевыми и широко доступными.

Экспериментально возможность поддержания разряда в инертных газах в СПС с диаметром сердцевинны 100 мкм и более с помощью СВЧ излучения была показана в [22], напряженности электрического поля, необходимые для поддержания СВЧ разряда в полых сердцевинах различного диаметра, заполненных различными инертными газами при различных давлениях, были измерены в [23]. Полученные результаты явились основой для создания первого газоразрядного волоконного лазера.

Первый газоразрядный волоконный лазер

В качестве источника СВЧ поля для поддержания газового разряда в СПС нами использовался магнетрон, работающий на частоте $\nu = 2.45 \text{ ГГц}$ в импульсном режиме. Частота следования импульсов составляла ~ 400 Гц, длительность импульса ~ 20 мкс. Максимальная пиковая мощность могла достигала 8 кВт.

Излучение магнетрона вводилось в металлический волновод прямоугольного сечения, который являлся одномодовым для СВЧ излучения. По волноводу распространялась только волна типа H_{10} . Поперечные размеры волновода слишком велики по сравнению с диаметром сердцевины СПС, чтобы плазма в сердцевине световода могла эффективно поглощать энергию СВЧ поля.

Поэтому для своеобразной фокусировки СВЧ излучения на СПС использовалась структура типа щелевой антенны (Рис. 2). Более подробно описание схемы возбуждения СВЧ разряда в СПС можно найти в [20].

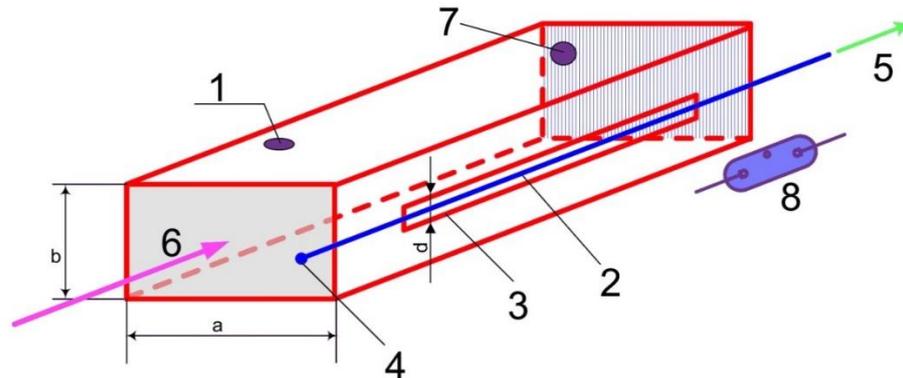


Рис. 2. Схема эксперимента. 1 – участок прямоугольного СВЧ-волновода, $a = 9$ см, $b = 4.5$ см, 2 – волоконный световод с поллой сердцевиной, 3 – продольная щель в боковой стенке волновода, 4 – запаянный конец волоконного световода, 5 – подсоединение волоконного световода к вакуумной системе и к системе заполнения газом, 6 – направление распространения электромагнитного излучения по волноводу от магнетрона, 7 – поршень, отражающий СВЧ излучение назад и формирующий таким образом стоячую волну; 8 – ртутная лампа для инициирования СВЧ разряда.

Эксперименты проводились с заполненными инертными газами (аргоном, неоном, гелием, под давлением от единиц до сотен торр) ПС из чистого кварцевого стекла (марки F300 фирмы Heraeus), диаметр сердцевины которых уменьшался последовательно до 100 мкм.

Известно, что для поджигания (или инициирования) разрядов всех типов (в том числе и под действием СВЧ поля) требуются значительно более высокие значения электрического поля, чем для его поддержания после инициирования. Поэтому в [20] для инициирования электрического разряда в ПС под действием СВЧ использовалась предварительная ионизация газа в сердцевине ПС, создаваемая с помощью УФ излучения. В результате электрический разряд зажигался и поддерживался СВЧ полем во всем отрезке ПС, расположенном в щели на боковой поверхности СВЧ волновода, т.е. на длине около 300 мм.

Типичная фотография волоконного световода с горящим в нем разрядом представлена на Рис. 3.

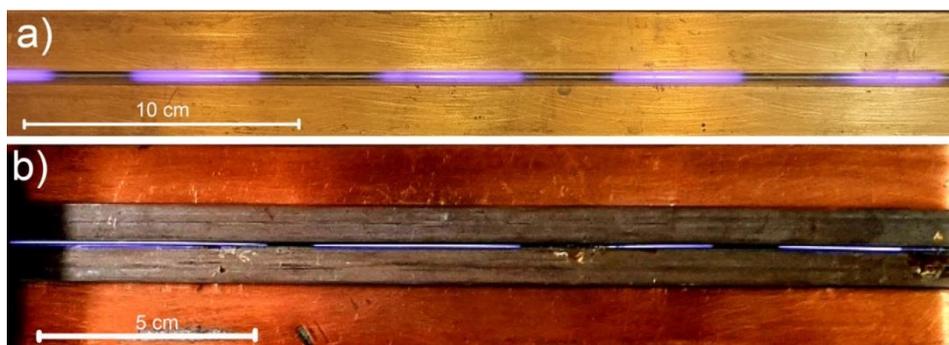


Рис. 3. СВЧ разряд в простом капилляре (а) и в револьверном световоде (b), заполненных аргоном под давлением 20 торр на фоне боковой поверхности волновода со щелью посередине. Капилляр с внутренним диаметром 3 мм помещен непосредственно в щель на боковой поверхности волновода; РС с диаметром полый сердцевины 230 мкм размещен между специальными накладками, уменьшающими эффективную ширину щели. В СВЧ волноводе формировалась стоячая волна за счет интерференции падающей и отраженной от короткозамыкающего поршня волн. Качество интерференционной картины зависело от параметров установки поршня.

Рассмотренная в предыдущем разделе схема возбуждения газового разряда в ПС под действием СВЧ излучения позволила впервые продемонстрировать ГРВЛ на револьверном волоконном световоде с полый сердцевинной [24].

Схема созданного ГРВЛ представлена на Рис. 4. Револьверный световод заполнялся смесью газов He:Ar:Xe в соотношении 100:10:1 при суммарном давлении 130 торр. Концы световода герметично вводились в миниатюрные вакуумные камеры, подключенные к вакуумной системе и к системе заполнения газами. Конструкции вакуумных камер также включали зеркала лазерного резонатора и допускали их юстировку. Глухое зеркало (Рис. 4, п.4) резонатора представляло собой полированную алюминевую пластину. Выходное зеркало (п.5) имело высокий коэффициент отражения на возможных длинах волн генерации ксенонового лазера за счет использования многослойного интерференционного покрытия. Спектр пропускания выходного зеркала представлен на Рис. 5. Часть лазерного револьверного световода длиной 32 см помещалась в область импульсного СВЧ поля. Максимальная напряженность электрического СВЧ поля, направленного перпендикулярно оси световода, достигала в экспериментах величины ~ 1 кВ/см. Вид поперечного сечения револьверного ПС показан на Рис. 6б. Диаметр полый сердцевины составлял 130 мкм.

СВЧ разряд инициировался в ПС с помощью кратковременного (~ 1 с) облучения УФ излучением ртутной лампы (Рис. 4, п.7). После юстировки зеркал резонатора возникала лазерная генерация на длине волны 2.027 мкм. При нарушении параллельности зеркал резонатора мощность генерации снижалась, и при наклоне глухого зеркала на угол более 0.02 рад генерация прекращалась.

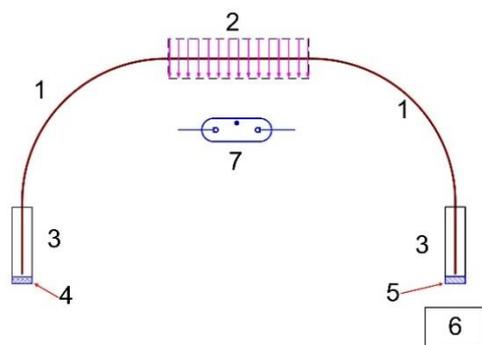


Рис. 4. Схема эксперимента. 1-СПС револьверного типа, длина 120 см; 2 – область СВЧ поля, длина 32 см; 3 – миниатюрные вакуумные камеры, подключенные к системе заполнения газом; 4 – глухое лазерное зеркало; 5-выходное лазерное зеркало; 6 – регистрирующая аппаратура (фотоприемник, спектроанализатор); 7 – ртутная лампа для инициирования СВЧ разряда.

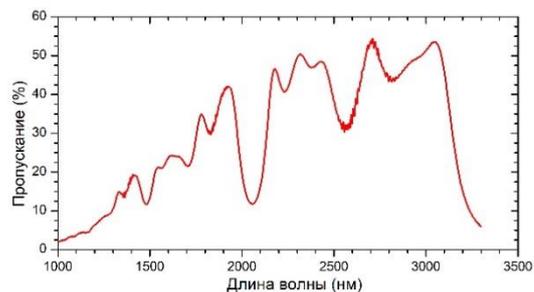


Рис. 5. Спектр пропускания выходного лазерного зеркала (п.5 на Рис. 4).

Спектр лазерного излучения регистрировался с помощью спектроанализатора Yokogawa AQ6375B (Рис. 7). Предварительно положение линии генерации определялось с помощью полосовых светофильтров. Осциллограммы лазерного излучения регистрировались с помощью фотодетектора, чувствительного в спектральном диапазоне от 1 до 5 мкм (Рис. 6а). Максимальная мощность генерации в пике составляла ~1мВт.

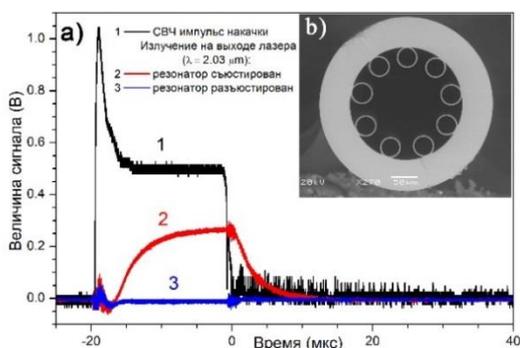


Рис. 6. а) Осциллограммы СВЧ импульса накачки и излучения ксенонового ГРВЛ в различных условиях. б) Поперечное сечение револьверного СПС, на котором получена генерация ГРВЛ.

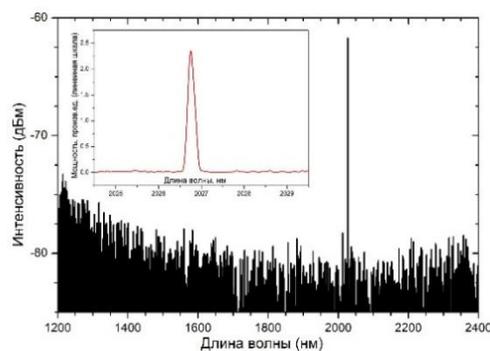


Рис. 7. Спектр излучения ксенонового газоразрядного волоконного лазера.

Представленные результаты показывают принципиальную возможность создания нового типа лазеров – газоразрядных волоконных лазеров. Тем самым открыты возможности совершенствования конструкции таких лазеров в ходе дальнейших исследований. В результате ГРВЛ, используя сочетание преимуществ волоконных и газоразрядных лазеров, найдут многочисленные применения в различных областях науки и техники.

1. F. Benabid, J.C. Knight, G. Antonopoulos, P.St.J. Russell, *Science* 298 (11), 399 (2002).
2. A.V. Vasudevan Nampoothiri et al., *Proc. SPIE* 7580, 758001 (2010).
3. A.M. Jones et al., *Opt. Express* 19 2309 (2011).
4. A.V. Vasudevan Nampoothiri et al., *Opt. Mater. Express* 2 (7), 948 (2012).
5. E. A. J. Marcatili, R.A. Schmelzter, *Bell Syst. Tech. J.* 43(4), 1783 (1964).
6. P.W. Smith, *Appl. Phys. Lett.* 19, 132 (1971).
7. R E. Jensen, M.S. Tobin, *Appl. Phys. Lett.* 20, 508 (1972).
8. С.А. Гончуков, С.Т. Корнилов, В.Н. Петровский и др., *Квантовая электроника* 2 (2), 406 (1975).
9. X, Shi, X.B. Wang, W. Jin, et al., *Proc. SPIE* 6767, 67670H (2007).
10. X, Shi, X.B. Wang, W. Jin, et al., *Appl. Phys. B* 91, 377 (2008).
11. X, Shi, X.B. Wang, W. Jin, et al., *IEEE Phot. Tech. Lett.* 20, 650 (2008).
12. S.A. Bateman, W. Belardi, F. Yu, et al., *Proc. CLEO 2014*, STh5C.10 (2014).
13. S.A. Bateman, W. Belardi, F. Yu, et al., *Proc. SOF 2014*, SoM4B (2014)
14. A.L. Love, S.A. Bateman, W. Belardi et al., *Proc. CLEO 2015*, SF2F (2015).
15. W.J. Wadsworth, A.L. Love, J.C. Knight, *Proc. SOF*, WT1A.1 (2015).
16. I.A. Bufetov, A.F. Kosolapov, A.D. Pryamikov, et al., *Fibers* 6 (2), paper 39 (2018).
17. B. Debord, R. Jamier, F. Gérôme et al., *Fibers* 7, 16 (2019).
18. M. Endo, R.F. Walter, *Gas Lasers* (Boca Raton: CRC Press, 2007).
19. B. Debord, R. Jamier, F. Gérôme et al., *Proc. CLEO 2011*, CThD5 (2011).
20. M. Moisan, C.M. Ferreira, Y. Hajlaoui, et al., *Revue de Physique Appliquée, Société française de physique / EDP* 17 (11), 707 (1982).
21. Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1987).
22. A. Gladyshev, S. Nefedov, A. Kolyadin, et al., *Photonics* 9 (10), 752 (2022).
23. И.А. Буфетов, А.В. Гладышев, С.М. Нефедов и др. *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки* 509, 3 (2023).
24. А.В. Гладышев, Д.Г. Комиссаров, С.М. Нефедов, и др. *Краткие сообщения по физике ФИАН №9*, 62 (2023) (перевод: *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 50 (9), 403 (2023)).

РАДИОФОТОННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СПЕКТРАЛЬНО ЧИСТЫХ СВЧ-СИГНАЛОВ

М.В. Герасимов, К.В. Киреев, Е.Ю. Мардаев

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

E-mail: gerasimov.mv12@gmail.com

Применение фотонных технологий в радиоэлектронике привело к формированию отдельного направления – радиофотоники (микроволновой фотоники) [1–3]. Компоненты и устройства радиофотоники предназначены для реализации функций приема, обработки, преобразования, хранения, передачи информации, преобразования энергии. Радиофотонная компонентная база – это изделия СВЧ-электроники и фотоники, представляющие собой совокупность электрически и оптически соединенных компонентов, образующих функционально и конструктивно законченные сборочные единицы. Совместное использование средств фотоники и СВЧ-электроники позволяет создавать устройства с уникальными техническими характеристиками.

Благодаря большой полосе пропускания (>40 ГГц), низким оптическим потерям (0,2 дБ/км) и устойчивости к электромагнитным помехам, методы и технологии радиофотоники актуальны для высокоскоростной обработки сигналов, что находит применение для аналоговых и цифровых радиочастотных систем. При этом, общим требованием высокоскоростной обработки сигналов является обеспечение точной синхронизации. Возникает необходимость в источниках тактового сигнала с очень низким фазовым шумом (с высокой чистотой спектра) для повышения разрешения в радиолокации и в измерительных системах, для мультиплексирования потоков данных и увеличения пропускной способности в оптических цифровых сетях, для повышения отношения сигнал/шум при аналого-цифровом преобразовании и для снижения фазового шума оптических импульсов в лазерных системах с активной синхронизацией мод. Перспективным направлением является применение такого типа генератора в качестве высокодобротного селективного усилителя для выборочного усиления маломощных радиочастотных сигналов в условиях сильных помех [4].

Ярким представителем фотонной системы, которая может обеспечивать тактовые СВЧ-сигналы с очень низким фазовым шумом в диапазоне длин волн от микроволнового до миллиметрового, является оптоэлектронный генератор (ОЭГ) [5–10], который представляет собой гибридную систему, состоящую из радиоэлектронной и фотонной подсистем (рис. 1). Ключевой особенностью такой системы является использование фотонной линии в качестве цепи обратной связи. ОЭГ является автогенератором и состоит из двух ключевых элементов: пассивной цепи с резонатором, который определяет спектр колебаний, и активного элемента, который компенсирует потери. Применение электрооптического (модулятор Маха-Цандера) и оптоэлектронного

(фотодетектор) преобразователей позволяет объединить электрическую и оптическую части (рис. 1), что лежит в основе построения ОЭГ, как гибридного генератора – кольцевого оптоэлектронного автогенератора.

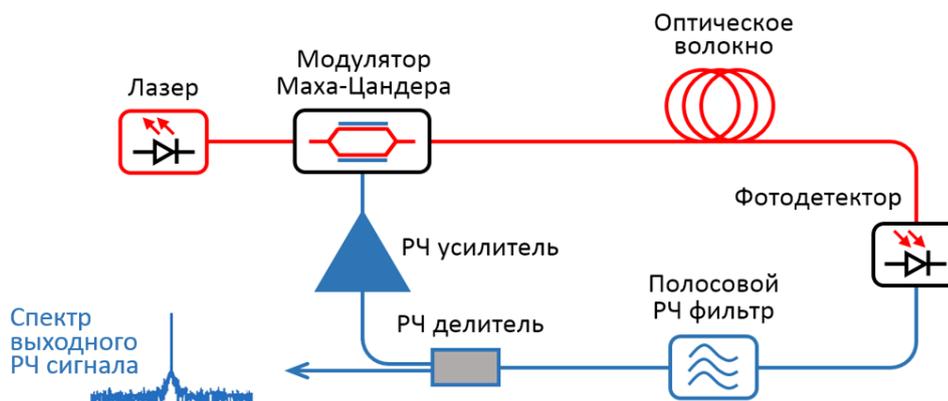


Рис. 1. Базовая схема одноконтурного ОЭГ: радиоэлектронная (синяя) и фотонная (красная) подсистемы

Источником СВЧ-колебаний являются собственные шумы элементов схемы автогенератора. Для устойчивой генерации необходимо выполнение нескольких важных требований:

- выполнение условий баланса амплитуд и баланса фаз;
- наличие источников шума в цепи генератора;
- наличие компонента с нелинейной передаточной функцией.

Принцип работы ОЭГ заключается в следующем. На вход модулятора Маха-Цандера поступает непрерывное излучение от генератора оптической несущей – лазерного модуля. Флуктуации элементов схемы – шум интенсивности лазера, дробовой шум фотодетектора, тепловые шумы электронных элементов – на начальном этапе выступают в качестве широкополосного модулирующего сигнала для оптической несущей. Модулированное оптическое излучение проходит через волоконно-оптический тракт и поступает на фотодетектор, где происходит процесс демодуляции. Полосовой радиочастотный (РЧ) фильтр выделяет полосу частот, подавляя колебания на других частотах. Одна часть СВЧ-сигнала с помощью делителя мощности направляется на выход схемы, а другая, после усиления мощности, – на вход модулятора Маха-Цандера, замыкая тем самым цепь положительной обратной связи. Таким образом, за первый обход кольцевого резонатора спектр генерации ОЭГ определяется параметрами полосового РЧ фильтра. Самое интересное начинает развиваться с ростом числа таких обходов, когда постепенно, но все с большей эффективностью начинают проявляться условия работы автогенератора: баланс амплитуд и баланс фаз.

Компоненты с нелинейной передаточной функцией необходимы для ограничения и стабилизации амплитуды колебаний, что способствует переходу ОЭГ в стационарный режим генерации. Одним из таких компонентов является электрооптический амплитудный модулятор, построенный на основе оптического интерферометра Маха-Цандера. При

этом в качестве рабочей точки на передаточной функции обычно выбирается положительная квадратурная точка (рис. 2). Индуцированный приложенным к полосковой линии электрическим напряжением фазовый сдвиг $\delta\varphi$ позволяет управлять результатом интерференции света на выходе интерферометра – выходной оптической мощностью P_{out} .

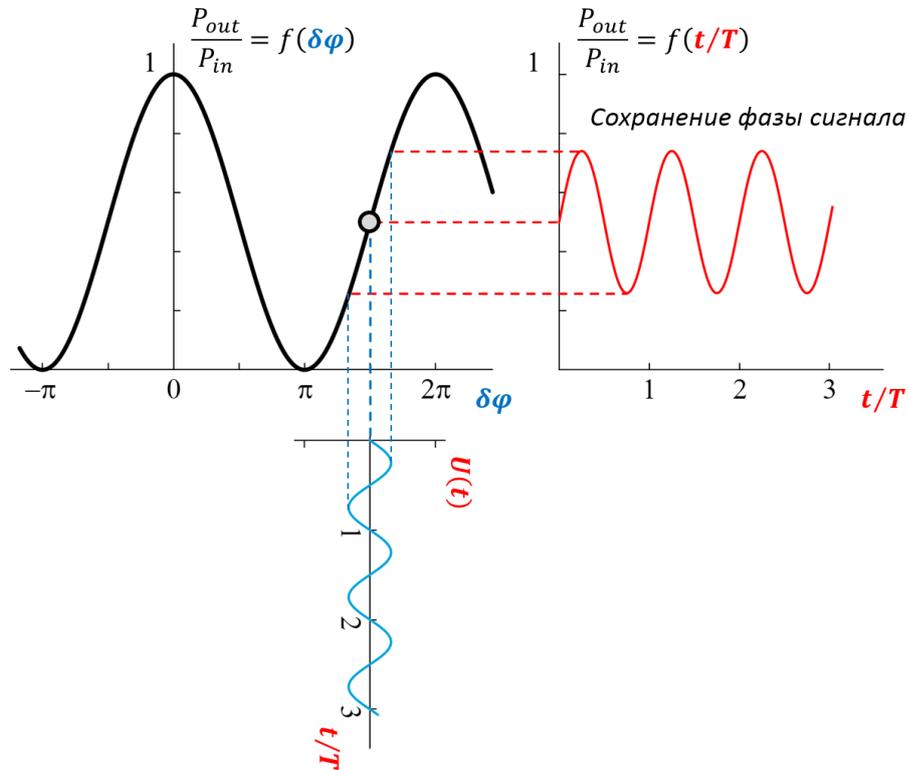


Рис. 2. Пример передаточной функции модулятора Маха-Цандера. Входной электрический (синий) и выходной оптический (красный) сигналы для положительной квадратурной рабочей точки

Волоконно-оптический тракт, как ключевой элемент фотонной линии, определяет параметры резонатора. Низкий уровень потерь в фотонной линии позволяет реализовать для ОЭГ кольцевой резонатор большой длины и, следовательно, высокой добротности. Ширина спектра отдельной моды обратно пропорциональна квадрату времени задержки в петли обратной связи и мощности, введенной в резонатор [7]. При этом спектр генерации одноконтурного ОЭГ представляет собой ряд равноудалённых друг от друга мод, поскольку межмодовый интервал (область свободной дисперсии) в схеме с длинным резонатором часто оказывается значительно меньше полосы пропускания используемого полосового РЧ фильтра (рис. 1), что приводит к многомодовому режиму генерации ОЭГ [8,9] (рис. 3). Это обуславливает одну из основных проблем ОЭГ – селекцию продольных (спектральных) мод в оптических резонаторах для получения одночастотного режима генерации – одномодовой генерации. Для подавления паразитных мод в спектре генерации ОЭГ применяют различные технические решения [11]: несколько контуров, инжекционную синхронизацию, частотную модуляцию, оптический усилитель, другие типы резонаторов, исключают

полосовой СВЧ-фильтр и другие решения. Несмотря на то, что в области разработки ОЭГ достигнут значительный прогресс, по-прежнему сохраняется задача по улучшению таких характеристик ОЭГ, как спектральная чистота СВЧ-сигнала и его долговременная частотная стабильность [10].

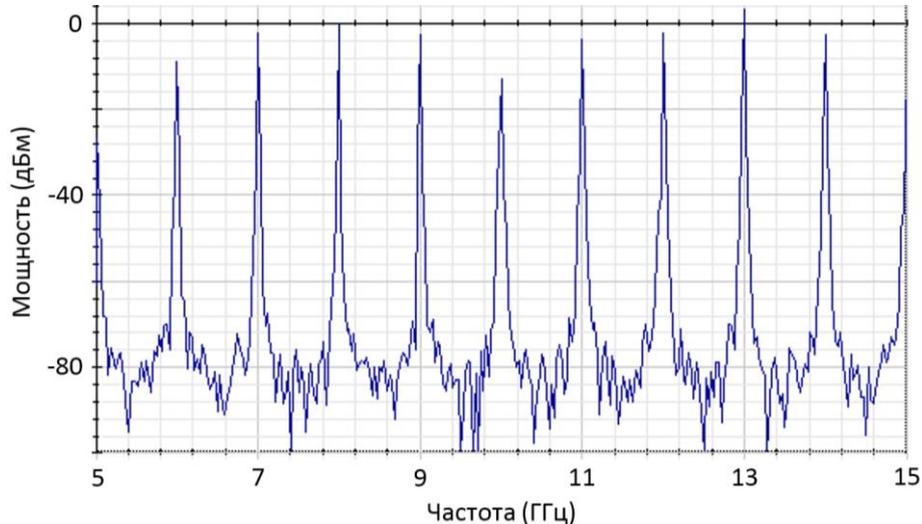


Рис. 3. Типичный спектр генерации ОЭГ с длиной контура 200 м. Параметры РЧ фильтра: центральная частота 10 ГГц и полоса пропускания 10 МГц.

Важную роль для улучшения характеристик ОЭГ играет понимание источников шума и причин формирования передаточной функции шума [12]. Общепринятым определением фазового шума $L(f)$ для ОЭГ является спектральная плотность мощности (СПМ) односторонней полосы генерируемого СВЧ-сигнала [13]. СПМ нормирована на мощность СВЧ-сигнала и измеряется в единицах дБн/Гц. В спецификации генератора указывают уровень фазового шума на определенной частоте отстройки от несущей. Применение резонатора с высокой добротностью позволяет добиться снижения фазового шума ОЭГ. В одномодовом режиме работы генератора именно ширина моды определяет спектр СВЧ-сигнала. Например, с использованием частотной модуляции в схеме ОЭГ достигнут сверхнизкий уровень фазового шума [14]: -160 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от частоты несущей 10 ГГц.

Для эффективного проектирования радиодетонных систем необходимо проведение имитационного эксперимента с применением средств вычислительной фотоники [15–17]. Это позволяет имитировать условия работы устройств и изменять характеристики компонентов в очень широких пределах, что часто бывает невозможно осуществить с помощью физических моделей. Поскольку физические испытания и лабораторные эксперименты в фотонике и радиодетонике требуют значительных финансовых затрат, моделирование позволяет повысить эффективность разработки конечного продукта.

В данной работе представлены результаты имитационных экспериментов по исследованию режимов работы моделей ОЭГ, созданных с использованием средств вычислительной фотоники. Для получения и

исследования одночастотного режима генерации созданы модели ОЭГ разных типов:

- двухконтурного ОЭГ;
- двойного ОЭГ с инжекционной синхронизацией;
- связанного ОЭГ с двойным выходом.

При создании моделей ОЭГ особое внимание уделено не только выбору ключевых компонентов, их параметров и передаточных функций, но и глобальным параметрам моделирования для повышения разрешения по частоте. Кроме того, модели позволяют регистрировать временную эволюцию спектра выходного СВЧ-сигнала ОЭГ, отражающую переход из режима установления генерации в квазистационарный режим.

Исследованы модели двухконтурного ОЭГ с резонаторами разной добротности, как одного из методов селекции продольных мод в оптических резонаторах, в которых использовано суммирование электрических и оптических сигналов. Обнаружено, что оптимальным для снижения уровня побочных мод является соотношение 1:5 между длинами контуров. При этом уровень побочных мод, сохраняющихся в спектре, ниже основной моды на 45 дБ. Показано, что уменьшение ширины линии излучения генератора оптической несущей приводит к снижению фазового шума выходного СВЧ-сигнала, а хроматическая дисперсия оптического волокна приводит к подавлению высокочастотных мод, что указывает на необходимость компенсации дисперсии оптического волокна при создании высокодобротных ОЭГ.

Выполнено исследование условий генерации и режимов работы моделей двойного ОЭГ с прямой, обратной и двунаправленной инжекционной синхронизацией. Обнаружено, что в схеме с прямой инжекцией роль ведущего генератора заключается в снижении фазового шума ведомого генератора. При обратной инжекции роль ведомого генератора заключается в снижении уровня побочных мод в спектре генерации ведущего генератора. Исследование модели ОЭГ с двунаправленной инжекционной синхронизацией с коэффициентами инжекции $\Gamma_{12} = \Gamma_{21} = 10\%$ (и проходными коэффициентами 90%) показало, что подбор параметров резонаторов с целью исключения совпадения центральных частот побочных мод ведущего и ведомого генераторов при сохранении одинаковыми центральных частот для выбранных мод приводит к эффективному подавлению побочных мод и повышению динамического диапазона выходных СВЧ-сигналов (рис. 4).

Объединение кольцевого волоконного лазера и ОЭГ в одну систему позволяет создать связанный генератор с двойным выходом (рис. 5), когда одновременно осуществляется генерация оптических импульсов с высокой временной стабильностью и РЧ-сигнала с высокой спектральной чистотой [18]. Такое техническое решение предполагает использование кольцевого волоконного лазера с активной синхронизацией мод, выполняющего роль генератора оптической несущей, и ОЭГ, выполняющего роль тактового

генератора для амплитудной внутрирезонаторной модуляции лазерного излучения.

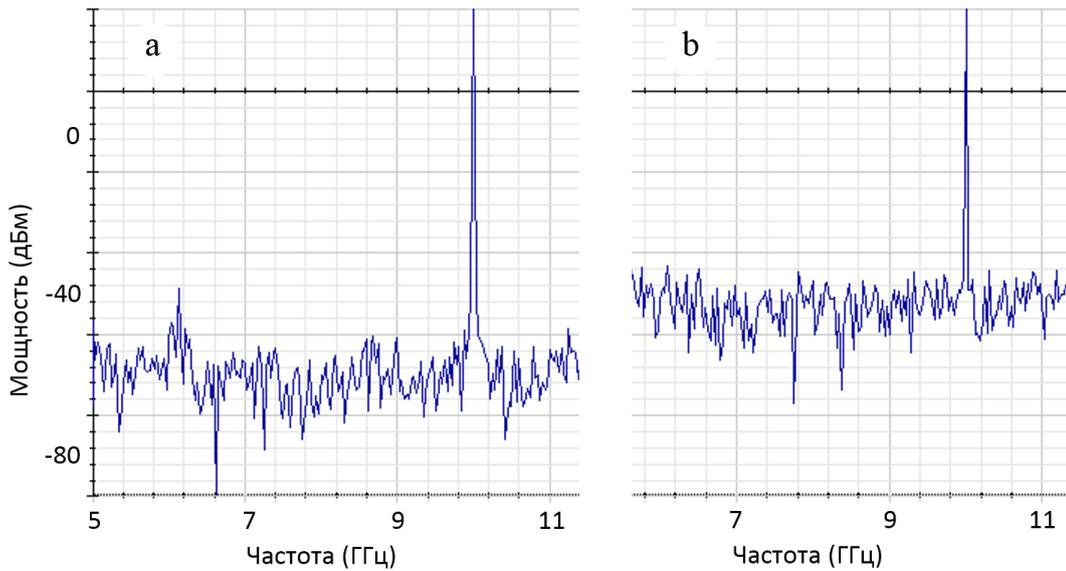


Рис. 4. Спектры генерации ОЭГ с двунаправленной инжекционной синхронизацией: ведущий ОЭГ с длиной контура 200 м (а) и ведомый ОЭГ с длиной контура 20 м (b)

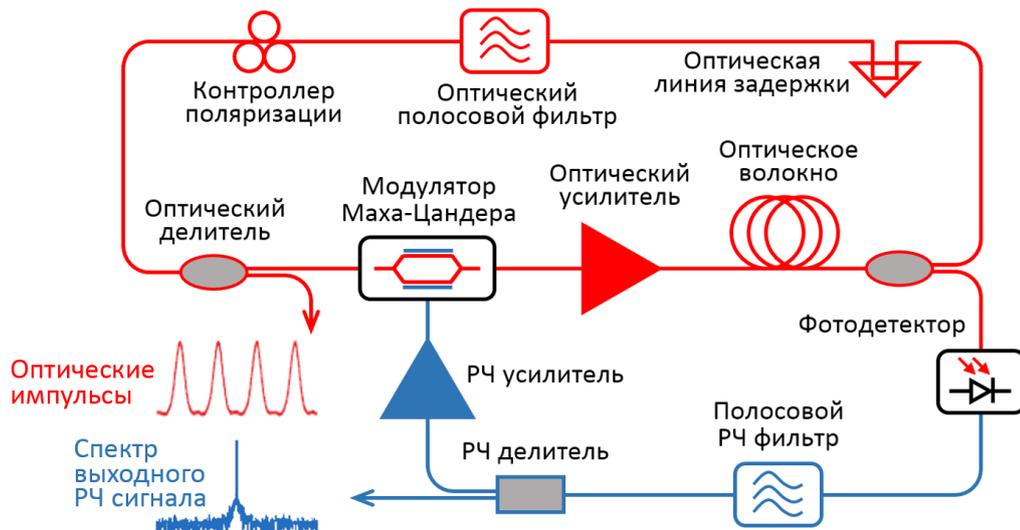


Рис. 5. Схема связанного ОЭГ с двойным выходом

Создана модель связанного ОЭГ с двойным выходом и исследованы режимы его работы. В режиме импульсной генерации получены лазерные импульсы с формой функции Гаусса субнаносекундной длительности. Исследована возможность управления длительностью и частотой следования лазерных импульсов за счет варьирования ширины спектра генерации кольцевого волоконного лазера и частоты ОЭГ. Зарегистрированы временные (от числа обходов резонатора) эволюции спектра генерации и формы лазерных импульсов кольцевого волоконного лазера с активной синхронизацией спектральных мод, позволяющие проследить этапы установления импульсного режима генерации.

1. A.J. Seeds, K.J. Williams, *Journal of lightwave technology*, **24**(12), 4628 (2006).
2. В. Урик, Д. МакКинни, К. Вилльямс, *Основы микроволновой фотоники*. М.: Техносфера, 2016.
3. М.Е. Белкин, А.С. Сигов, *Радиотехника и электроника*, **54**(8), 901 (2009).
4. P.S. Devgan, V.J. Urick, K.J. Williams, *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, 857 (2012).
5. A. Neyer, E. Voges, *Appl. Phys. Lett.*, **40**(1), 6 (1982).
6. V.V. Grigor'yants, A. A. Dvornikov, Yu. B. Il'in et al., *Optical and Quantum Electronics*, **17**(4), 263 (1985).
7. X.S. Yao, L. Maleki, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **32**(7), 1141 (1996).
8. L. Maleki, *IEEE*. 497 (2012).
9. P. Devgan, *ISRN Electronics*, ID 401969 (2013).
10. A. Liu, J. Dai, K. Xu, *Appl. Sci.*, **8**, 2623 (2018).
11. T. Hao, Y. Liu, J. Tang et al., *Advanced Photonics*, **2**(4), 044001 (2020).
12. E. Rubiola, *Phase noise and frequency stability in oscillators*, Cambridge University Press, 2012.
13. R. Navid, C. Jungemann, T. H. Lee et al., *Close-in phase noise in electrical oscillators*. In *Noise in Communication*, **5473** of Proceedings of SPIE, pp. 27–37, Maspalomas, Spain, May 2004.
14. D. Eliyahu, D. Seidel, L. Maleki, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **56**(2), 449 (2008).
15. E.C. Levy, O. Okusaga, M. Horowitz et al., *Optics Express*, **18**(20), 21461 (2010).
16. А.В. Лопарев. *Научный вестник МИРЭА*, №2(9), 41 (2010).
17. А.С. Задорин, А.А. Лукина, *Доклады ТУСУР*, **19**(4), 81 (2016).
18. X.S. Yao, L. Davis, L. Maleki, *J. Light. Tech.* **18**(1), 73 (2000).

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ОКСИДА ИТТЕРБИЯ: РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ, ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

А.А. Рыбалтовский¹, М.А. Мелькумов¹, С.С. Алешкина¹, М.М. Бубнов¹,
М.Е. Лихачев¹, А.Н. Абрамов², М.В. Яшков², Д.С. Липатов²

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,*

Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва

²*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН,*

Нижний Новгород

E-mail: lidenis@yandex.ru

Легирование сердцевины световода высокой концентрацией иттербия позволяет сократить его рабочую длину в волоконных источниках излучения, что весьма желательно для многих практических приложений: одночастотные лазеры; лазеры с синхронизацией мод с очень высокой частотой повторения; импульсные лазеры и усилители с высокой пиковой мощностью и т.д. В данной работе в качестве материала сердцевины световодов были исследованы 3 наиболее популярные матрицы: $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (AS), $\text{P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ (PS) и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ (APS). Цель работы заключалась в установлении максимально возможного уровня легирования данных стекол Yb_2O_3 (в том числе максимальные концентрации Al_2O_3 и P_2O_5) синтезируемых MCVD методом, при котором световоды сохраняют усилительные свойства.

Изготовление преформ проводилось с использованием тонкостенных опорных кварцевых труб. В качестве прекурсоров были выбраны наиболее чистые и летучие прекурсоры (SiCl_4 , POCl_3 , AlCl_3 , CCl_4 , $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$, $\text{Yb}(\text{thd})_3$), найдены оптимальные температуры термостатирования соединений и разработана схема их доставки в опорную трубу, исключая взаимодействие прекурсоров между собой и конденсацию паров малолетучих соединений. Разработана оригинальная методика раздельного осаждения компонентов стекла, с осаждением частично остеклованного тонкого слоя матрицы, пропиткой его Yb_2O_3 и окончательным сплавлением пропитанного слоя в прозрачное стекло. В данной методике осаждение компонентов стекла происходит в оптимальных условиях. Так, конверсия $\text{Yb}(\text{thd})_3$ в Yb_2O_3 протекает при сниженной до 1400 °С температуре. За счет этого достигается хорошее распределение иттербия по длине преформы. На стадии пропитки основная часть воды удаляется из опорной трубы, а высокотемпературное сплавление слоя протекает в атмосфере хлора и кислорода. В результате достигается высокий уровень чистоты синтезируемых стекол по содержанию ОН групп. Главным достоинством методики является возможность введения в силикатные стекла сколь угодно высокой концентраций Yb_2O_3 , ограниченной только его растворимостью в конкретной матрице.

Было изготовлено 3 серии Yb -световодов с FAS, AS, PS и APS сердцевиной в широком диапазоне составов стекла сердцевины и проведено

подробное исследование их свойств. Впервые для каждой из перечисленных матриц достигнут рекордно высокий уровень легирования Yb_2O_3 , сопоставимый с концентрацией солегирующих добавок. Обнаружен чрезвычайно высокий концентрационный предел вхождения Yb_2O_3 в AS матрицу, достигающий 4,5 мол% при содержании всего 1,7 мол.% Al_2O_3 , при котором уровень оптических потерь в световодах не превышает 0,5 дБ/м (1150 нм). Увеличение же содержания Al_2O_3 до 3 мол% резко снижает как минимальные потери (до 0,05 дБ/м@1150 нм), так и уровень индуцированных фотопотемнением потерь (200 дБ/м@633 нм). Установлена предельная концентрация солегирующей добавки AlPO_4 (~20 мол%), которая может быть введена Yb-APS стекло (разрушение преформы вследствие большой разницы КТР материалов) и соответствующий ей предельный уровень легирования Yb_2O_3 (2,4 мол%). Найдена зависимость соотношения концентраций Yb_2O_3 и AlPO_4 , обеспечивающая низкие оптические потери в световодах, согласно которой на 1 мол% Yb_2O_3 требуется 7,5 мол% AlPO_4 . Определен максимальный уровень совместного легирования кварцевого стекла P_2O_5 и Yb_2O_3 в MCVD процессе, 12 и 2,5 мол%, соответственно. Максимальное содержание фосфора и иттербия в Yb-PS стекле ограничивается образованием летучих соединений в условиях MCVD процесса (образование пузырей).

Впервые было обнаружено, что низкие оптические потери, а также низкие потери, наведенные фотопотемнением, не являются гарантией усилительных свойств световодов с AS и APS сердцевиной. Для обеих матриц предельная концентрация Yb_2O_3 составляет ~ 1,3 мол% при которой световоды сохраняют максимальную эффективность усиления, 75 и 79% соответственно. Дальнейший рост концентрации иттербия сопровождается деградацией усилительных свойств световодов, вплоть до полной утраты ими способности усиливать сигнал.

Впервые обнаружен эффект концентрационного тушения люминесценции ионов Yb^{3+} в Yb-AS и Yb-APS стеклах, наличие которого было подтверждено измерениями времени жизни люминесценции, квантового выхода и уровня непросветляемых оптических потерь. Значения всех трех параметров коррелируют между собой и снижаются с ростом концентрации Yb_2O_3 в AS и APS стеклах. Предположительно причиной концентрационного тушения люминесценции в высоколегированных Yb-AS и Yb-APS стеклах является множественное взаимодействие ионов Yb^{3+} или же процесс миграционно-ускоренного тушения на таких примесях как OH группы или центрах окраски, генерируемых процессом фотопотемнения. Исключение составили Yb-световоды с PS сердцевиной, имеющие самую высокую эффективность усиления (выше 90%), которая не снижается даже в случае предельно высокой концентрации Yb_2O_3 (2,5 мол%). Кроме этого, Yb-PS световоды оказались совершенно не подвержены эффекту фотопотемнения (уровень наведенных потерь существенно ниже 1 дБ/м в области 1 мкм).

В качестве практического применения исследованных световодов можно выделить следующие разработки. Продемонстрирован рекордно короткий, высокоэффективный волоконный усилитель на основе Yb-APS световода: длина всего 3,8 см, эффективность преобразования накачки в сигнал 79%. Разработан конусный Yb-APS-LMA (large mode area) световод с пьедесталом. На его основе создан полностью волоконный усилитель и проведены эксперименты по усилению chirпированных импульсов. Предельный уровень энергии импульсов при гауссовом качестве их сжатия составил 20,4 мкДж, что соответствует пиковой мощности 50,9 МВт. Максимальная пиковая мощность составила 92 МВт (рекордно высокая для полностью волоконных систем) в импульсах длительностью 670 фс при энергии импульса 61,8 мкВт и средней мощности 3,5 Вт. На основе высоколегированного Yb-PS световода создан стабильный одночастотный волоконный лазер (1066,4 нм) мощностью свыше 30 мВт. Кроме этого, в настоящее время Yb-PS световоды широко используются для военных применений (танковое прицельное устройство Сосна-У).

Исследование выполнено в рамках государственного задания FFSR-2022-0005.

ГАЛОГЕНИДЫ СЕРЕБРА – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ВОЛОКОННОЙ ИК-ТЕХНИКИ

С.М. Пилюшко, М.С. Кузнецов, К.С. Зараменских,
А.А. Пахомова, А.Р. Романенко, Г.В. Полякова, Л.Н. Бутвина
*Государственный научно-исследовательский и проектный институт
редкометаллической промышленности «Гиредмет», г. Москва
E-mail: vorpat2402@bk.ru*

Световоды для длинноволновой области спектра применяются в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, а также в различных областях медицины и промышленности. Востребованность в силовой и волновой оптике среднего и дальнего ИК-диапазона продолжает расти ввиду постоянного развития таких сфер, как космические исследования, экологический мониторинг, медицинская диагностика и лечение заболеваний (в том числе стоматологических), синтез органических и фармацевтических веществ [1]. Среди кристаллических материалов перспективными являются галогениды серебра и их соединения. Они прозрачны в 10-микронной области, малорастворимы, обладают дезинфицирующим действием, безопасны для человека, имеют не только широкий спектральный диапазон пропускания (от 2 до 20 мкм), но и удовлетворительные прочностные качества и химическую устойчивость [2]. Возможность применения оптического волокна на основе КРС-11 и КРС-13 изучается на базе предприятия АО «Гиредмет», где технология изготовления монокристаллических заготовок из данных материалов хорошо отработана [3].

По итогам исследования была подготовлена система контроля основных параметров волокна, изготовленного из галогенидов серебра. Получены основные параметры изготовленных световодов такие как: спектральное пропускание, спектральная зависимость поглощения, а также показатель поглощения на длине волны 10,6 мкм.

1. К.С. Зараменских, М.С. Кузнецов, Л.Н. Бутвина и др. Фотон-экспресс. **6 (174)**, 315-316 (2021).

2. L. Butvina, "Polycrystalline Fibers" in the book "Infrared Fiber Optics", Edited by A.S. Sanghera, I.D. Aggarwal, CRC Press, Boca Raton, 1998, pp. 209-249.

3. С.М Пилюшко, В.О. Умнов, М.С. Кузнецов и др. Лазеры в науке, технике, медицине: Сборник научных трудов XXXIII Международной конференции –М. –2022, Том 33, –с. 102-106.

РАЗРАБОТКА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ С ОПТИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОЙ

А.А. Южакова¹, Д.Д. Салимгареев¹, А.Е. Львов¹, П.В. Пестерева¹,
И.В. Южаков¹, Л.В. Жукова¹

¹Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
E-mail: l.v.zhukova@urfu.ru

Волоконная оптика среднего ИК диапазона находит свой применение в лазерных технологиях, оптоэлектронике, спектроскопии, диагностике заболеваний, термографии. Однако подавляющее большинство данных применений основано на использовании световодов с оптической оболочкой. Среди галогенидных волоконных материалов известны световоды с оптической оболочкой на основе системы AgCl – AgBr [1], с относительно узким диапазоном пропускания 2–18 мкм и малым сроком службы из-за фоточувствительности. Решением данной проблемы может стать разработка ИК световодов на основе новых материалов систем AgBr – AgI, AgCl_{0,25}Br_{0,75} – TlBr_{0,46}I_{0,54} и AgCl_{0,25}Br_{0,75} – TlCl_{0,74}Br_{0,26}, которые способны не только увеличить диапазон спектрального пропускания, но и являются более твердыми, фото- и радиационно-стойкими.

На первом этапе осуществлялся анализ свойств оптических материалов и моделирование распространения излучения по волокнам, по итогам которых были выбраны составы, обеспечивающие разницу между показателями преломления сердцевины-оболочки не более 0,01. Далее осуществлялся синтез монокристаллов заданного состава по методам термозонной кристаллизации-синтеза и Бриджмена. Монокристаллы для оболочки и сердцевины подвергались химико-механической обработке, после чего по методу rod-in-tube из них изготавливалась заготовка для экструзии. Эта заготовка помещалась в контейнер, устанавливались фильера с внутренним диаметром 1120 мкм, плунжер и вспомогательные элементы, вся оснастка в собранном виде устанавливалась в пресс ПОИ-500. Заготовка нагревалась до 200 °С, после чего выдерживалась при данной температуре в течение 90 мин для достижения высокой пластичности и экструдировалась. В результате были получены ИК волокна длиной 1,2–3,3 м, диаметром 1120 мкм. Волокна помещались во фторопластовую оболочку и оконцовывались SMA-коннекторами. Волокна показали спектральное пропускание в диапазоне 3,5–27,0 мкм без окон поглощения. Минимальные потери достигали 0,2 дБ/м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

1. L.N. Butvina, E.M. Dianov, D.V. Drobot, et al., Proc. SPIE 1048, Infrared Fiber Optics (1989) 17-23.

ВИСМУТОВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ ДЛЯ УСИЛИТЕЛЕЙ Е- И S-ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН С НАКАЧКОЙ ПО ОБОЛОЧКЕ

Д.И. Олейник¹, А.А. Умников¹, А.Н. Абрамов¹, А.С. Вахрушев²,
С.В. Алышев², А.М. Хегай², Е.Г. Фирстова², М.А. Мелькумов²,
С.В. Фирстов²

¹Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН,
Нижний Новгород

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Научный центр волоконной оптики им. Е. М. Дианова, Москва
E-mail: od@ihps.ru

Висмутовые волоконные лазеры и усилители являются перспективными для получения лазерной генерации и усиления в широком диапазоне длин волн 1.1–1.8 мкм. В зависимости от состава стекла сердцевины висмутовые световоды демонстрируют разные характеристики, и, в частности, световоды на основе GeO₂–SiO₂ стекла предназначены для области длин волн 1360–1500 нм.

Преформы световодов изготавливались полностью газовой MCVD технологией. В качестве прекурсора висмута использовался BiBr₃, который термостатировался при температуре ≈185 °С, в качестве газ-носителя использовался He. Профиль световедущей структуры формировался послойным осаждением GeO₂–SiO₂ стекла, где варьировалась концентрация добавки GeO₂ и итоговый профиль показателя преломления стекла сердцевины был близок к градиентному. Легирование центральной части сердцевины висмутом производилось двухстадийным методом, где осажденный обратным проходом пористый слой GeO₂–SiO₂ стекла остекловывался в потоке BiBr₃. После чего производилось схлопывание трубки с осажденными слоями в потоке O₂ и CCl₄ для снижения концентрации ОН-групп. Из изготовленной преформы вытягивались световоды с диаметром сердцевины ≈30 мкм и ≈60 мкм.

Разработанные висмутовые световоды могут служить основой для создания усилителя мощности, работающего в Е- и S-диапазонах, который способен обеспечить выходную мощность ≈ 1 Вт при использовании многомодовой диодной накачки на длине волны 808 нм.

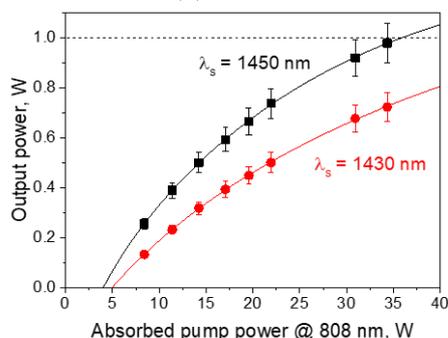


Рис. 1. Зависимости выходной мощности от поглощенной мощности накачки для усилителя на основе висмутового световода с диаметром сердцевины ≈60 мкм.

Работа выполнена в рамках госзадания ИХВВ РАН № FFSR–2022–0005.

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Судьин¹, С.Н. Ушаков^{1,2}, И.А. Волков¹, К.Н. Нищев¹, Н.А. Юдин¹,
М.А. Усламина¹, М.Ю. Власов^{1,3}

¹Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

³Инжиниринговый центр волоконной оптики, Саранск

E-mail: aleksandr.sudin1999@mail.ru

Модификация показателя преломления в прозрачных материалах под действием лазерного излучения активно исследуется последние десятилетия. Особый интерес в этой области проявляется к источникам излучения с фемтосекундной длительностью импульса [1]. Это связано с их способностью эффективно изменять значение показателя преломления в практически любых прозрачных материалах. В настоящее время с помощью фемтосекундных лазеров можно изготавливать волоконные брэгговские решетки, оптические волноводы, различные микрооптические компоненты и т.д.

В этой работе, в качестве задающего источника предлагается полностью волоконный лазер с самосинхронизацией мод. Минимальная мощность накачки, при которой достигается самосинхронизация мод, 1.46 Вт. Увеличение мощности накачки приводит к небольшому уширению оптического спектра. На рис. 1 представлены оптический спектр и огибающая импульса выходного излучения лазера, полученные при мощности накачки 2,23 Вт. Выходная мощность излучения при этом составляет 10 мВт. Излучение имеет центральную длину волны 1081,2 нм с шириной на уровне 3 дБ 33 нм. Лазер работает на фундаментальной частоте повторения импульсов 4.7 МГц.

Работа выполнена при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере».

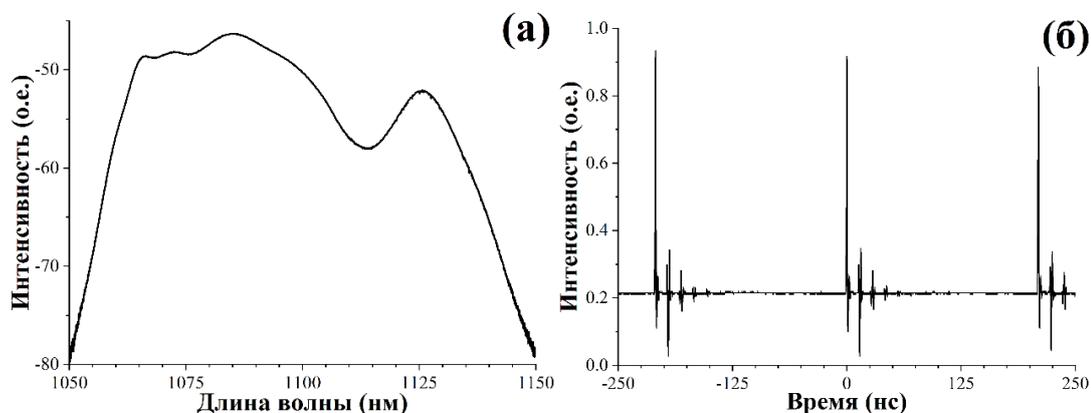


Рис. 1. Оптический спектр (а) и огибающая импульса (б) выходного излучения волоконного лазерного источника.

1. X. Wang et al., *Optics & Laser Technology*, **135**, 106687 (2021).

ДИНАМИКА ЧАСТОТНО МОДУЛИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АКТИВНОМ СВЕТОВОДЕ С ПРОДОЛЬНО МЕНЯЮЩЕЙСЯ ДИСПЕРСИЕЙ

А.С. Абрамов, В.А. Лапин, П.П. Миронов

*Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы,
Ульяновский государственный университет*

E-mail: lva2013@yandex.ru

Исследуется способ получения усиления и временной компрессии частотно модулированных импульсов в активном световоде с профилем зависимости дисперсии от длины подобранном таким образом, чтобы обеспечивать максимальные степени сжатия импульсов с заданным начальным чирпом при постоянном усилении световода.

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [1, 2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = gA \quad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – дисперсия групповых скоростей второго порядка (ДГС), R – Керровская нелинейность, g – коэффициент усиления в волокне.

В работе была выбрана зависимость дисперсии вида [2]:

$$d_2(z) = -|d_{20}| \exp\left[-\frac{\alpha_0 |d_{20}|}{g_0} (\exp(2gz) - 1) + 2gz\right] \quad (1)$$

где α_0 – начальный чирп импульса. В работе рассматривался частотно модулированный импульс:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}(\tau / \tau_0) \exp(i\alpha_0 \tau^2) \quad (2)$$

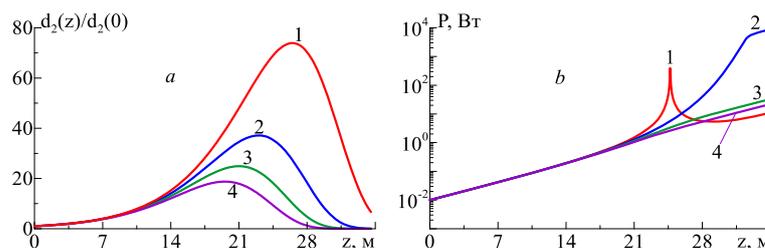


Рис. 1. Зависимость нормированной ДГС

$d_2(z) = -|d_{20}| \exp\left[-\kappa (\exp(2g_0 z) - 1) + 2g_0 z\right]$ (a) и пиковой мощности (b) при

$\kappa = (0.5; 1; 1.5; 2) \cdot (\alpha_0 |d_{20}| / g_0)$ – кривые (1-4).

Приведенные на рисунке зависимости показывают, выбранная зависимость является наилучшей для использованных значений расчетных параметров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-22-00412.

1. G.P. Agrawal “Nonlinear Fiber Optics” (Elsevier, 2013).
2. A. Abramov et al., Photonics **9** (3), 160 (2022).

СПЕКТРЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЗАВИСИМОГО УСИЛЕНИЯ В ФОСФОРСИЛИКАТНЫХ ВИСМУТОВЫХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

А.В. Елопов¹, К.Е. Рюмкин¹, Ф.В. Афанасьев², С.В. Алышев¹,
А.В. Харахордин¹, А.М. Хегай¹, Е.Г. Фирстова¹, С.В. Фирстов¹,
М.А. Мелькумов¹

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,

Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва

²Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,
Нижний Новгород

E-mail: elopov@fo.gpi.ru

Поляризационно-зависимое усиление (ПЗУ) является изученным явлением в эрбиевых волоконных усилителях, которые повсеместно используются для усиления сигнала в телекоммуникационных линиях. Волоконно-оптические линии связи с эрбиевыми усилителями могут накапливать до 4 дБ разницу в усилении, что приводит к деградации качества работы волоконной линии связи [1]. Несмотря на все большее распространение висмутовых волоконных усилителей (ВВУ), в них данный эффект не изучался. Однако, следует ожидать, что ПЗУ будет гораздо сильнее проявляться в ВВУ в силу того, что анизотропия висмутовых активных центров (ВАЦ) существенно выше, чем у ионов эрбия: 0.2-0.3 в ВАЦ [2] против 0.6-0.7 у ионов эрбия [3].

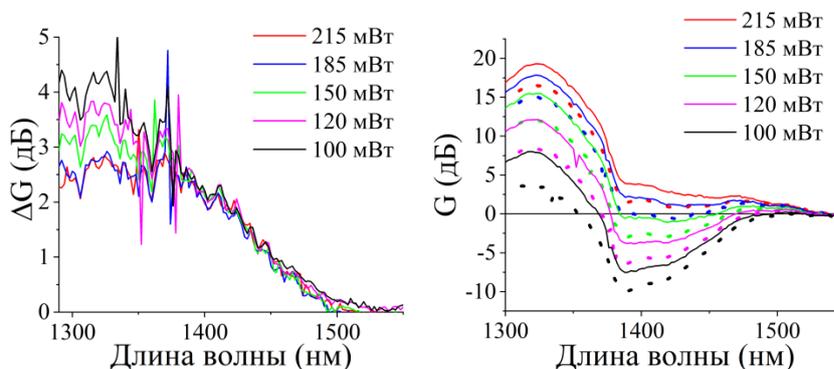


Рис.1. Спектры ПЗУ (слева) и усиления слабого сигнала при параллельном (сплошная линия) и ортогональном (пунктирная линия) взаимном направлении поляризации накачки и сигнала (справа) в фосфоросиликатном ВВУ на различных мощностях накачки.

В настоящей работе мы хотим представить ПЗУ в ВВУ на основе фосфоросиликатных активных световодов, Рис. 1.

Данная работа поддержана грантов Российского научного фонда №22-79-00157, <https://rscf.ru/project/22-79-00157/>.

1. E. Lichtmann, Electron. Lett. **29**, 1969-1971 (1993).
2. A. V. Elopov, et al., Photonics **10**, 860 (2023).
3. L. O. Martinez-Martinez, et al., REV MEX FIS **59**, 302-308 (2013).

НИЗКОАПЕРТУРНЫЕ СВЕТОВОДЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ ВИСМУТОМ, ДЛЯ НАКАЧКИ ПО ПЕРВОЙ ОБОЛОЧКЕ

А.Н. Абрамов¹, Д.Ф. Бурмистров¹, М.В. Яшков¹, А.С. Вахрушев²,
А.В. Харахордин², С.В. Альшев², С.В. Фирстов², М.А. Мелькумов²

¹ Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН,
Нижний Новгород

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва
E-mail: denburmistrov2001@gmail.com

Разработка эффективных висмутовых волоконных световодов (ВС) с двойной оболочкой позволит использовать для их накачки мощные лазерные диоды, что в свою очередь обеспечит, значительное упрощение их конструкции, а, в перспективе, и большую выходную мощность устройств на их основе.

В настоящей работе представлены результаты наших исследований ВС из заготовки полученной методом MCVD, со стеклом сердцевины состава $\text{Vi:GeO}_2\text{-F-SiO}_2$, с малой величиной разницы показателей преломления оболочки и сердцевины $\Delta n \sim 0.0015$, и поглощением висмута по сердцевине 3 дБ/м на 1400 нм. Благодаря малому уровню Δn и большой концентрации ВАЦ-Si удалось повысить поглощение по оболочке до уровня 0,55 дБ/м на 820 нм для ВС с отсечкой $\sim 1,56$ мкм, что позволяет обеспечить одномодовый режим лазерной генерации в области вблизи 1,46 мкм.

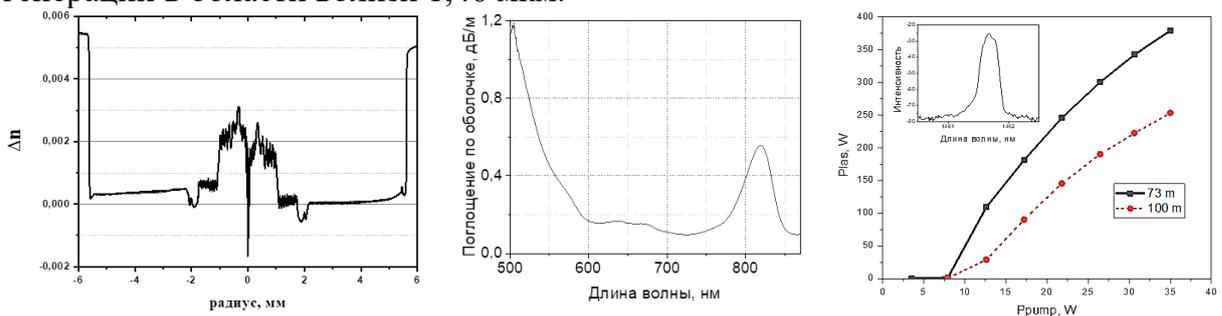


Рис.1. Профиль Δn , поглощение по оболочке и выходная мощность генерации.

В качестве прекурсора висмута использовался ViBr_3 , а прекурсора фтора, понижающего Δn , – $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$. Трудность контроля состава стекол со фтором, и как следствие Δn , обусловлено образованием в процессе синтеза, таких летучих компонентов, как GeF_4 , POF_3 и SiF_4 .

Был изготовлен световод с двойной оболочкой с диаметром сердцевины ~ 20 мкм, и размером кварцевой оболочки, выполненной в форме восьмигранника, 125 мкм. Данный ВС был протестирован на генерационные свойства в линейной схеме лазера с накачкой по оболочке на 808 нм. Максимальная введенная в активный ВС мощность накачки составляла 35 Вт, что позволило получить ~ 380 мВт на 1461 нм. Поглощение накачки в лазере составило более 90 % для оптимальной длины ВС – 73 м. Дифференциальная эффективность лазера была довольно низкой $\sim 1.5\%$ от поглощенной мощности накачки. Причины низкого КПД до конца не ясны.

Работа была выполнена в рамках госзадания ИХВВ РАН № FFSR-2022-0005. Работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 22-19-00708).

Fiber optics

RADIO PHOTONIC APPROACH FOR GENERATION OF SPECTRALLY PURE MICROWAVE SIGNALS

M.V. Gerasimov, K.V. Kireev, E.Yu. Mardaev

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk

E-mail: gerasimov.mv12@gmail.com

The use of photonic technologies in radio electronics has led to the formation of a separate direction – radio photonics (microwave photonics) [1–3]. Components and devices of radio photonics are intended to implement the functions of receiving, processing, converting, storing, transmitting information, and converting energy. The radio photonic component base is products of microwave electronics and photonics, which are a set of electrically and optically connected components that form functionally and structurally complete assembly units. The joint use of photonics and microwave electronics allows for the creation of devices with unique technical characteristics.

Due to the large bandwidth (>40 GHz), low optical losses (0.2 dB/km) and immunity to electromagnetic interference, the methods and technologies of radio photonics are relevant for high-speed signal processing, which finds application in analog and digital radio frequency systems. At the same time, the general requirement for high-speed signal processing is to ensure accurate synchronization. There is a need for clock signal sources with very low phase noise (with high spectrum purity) to increase the resolution in radar and measurement systems, to multiplex data streams and increase the throughput in optical digital networks, to increase the signal-to-noise ratio in analog-to-digital conversion and to reduce the phase noise of optical pulses in laser systems with active mode locking. A promising direction is the use of this generator type as a high-Q selective amplifier for selective amplification of low-power radio frequency signals in conditions of strong interference [4].

A striking example of a photonic system that can provide microwave clock signals with very low phase noise in the microwave to millimeter wavelength range is an optoelectronic generator (OEO) [5–10], which is a hybrid system consisting of a radio-electronic and photonic subsystems (Fig. 1). The key feature of such a system is the use of a photon line as a feedback loop. OEO is a self-exciting oscillator and consists of two key elements: a passive loop with a resonator that determines the oscillation spectrum, and an active element that compensates for losses. Application electro-optical (Mach-Zehnder modulator) and optoelectronic (photodetector) converters allows to combined the electrical part and the optical part (Fig. 1), which is the basis for constructing the OEO as a hybrid generator – a ring optoelectronic self-exciting oscillator.

The source of microwave oscillations is the intrinsic noise of the elements of the self-exciting oscillator loop. For stable generation, several important requirements must be met:

- implementation of the conditions of amplitude balance and phase balance;
- presence of noise sources in the generator loop;

- presence of a component with a nonlinear transfer function.

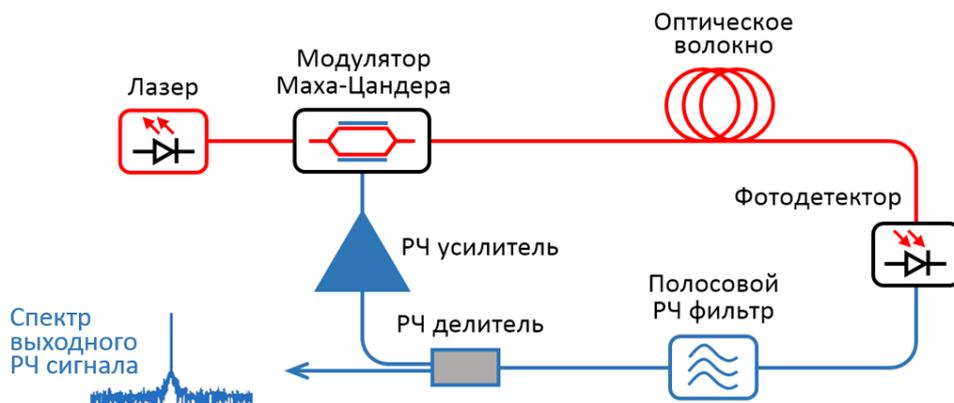


Fig. 1. Basic diagram of a single-loop OEO: radio electronic (blue) and photonic (red) subsystems

The principle of operation of the OEO is as follows. Continuous radiation from the optical carrier generator – the laser module – is fed to the input of the Mach-Zehnder modulator. Fluctuations of the loop elements – laser intensity noise, photodetector shot noise, thermal noise of the electronic elements – at the initial stage act as a broadband modulating signal for the optical carrier. The modulated optical radiation passes through the fiber-optic path and enters the photodetector, where the demodulation process occurs. The bandpass radio frequency (RF) filter selects a frequency band, suppressing oscillations at other frequencies. One part of the microwave signal is directed to the output of the loop using a power divider, and the other, after power amplification, to the input of the Mach-Zehnder modulator, thereby closing the positive feedback loop. Thus, for the first round trip of the ring resonator, the OEO generation spectrum is determined by the parameters of the bandpass RF filter. The most interesting thing begins to develop with the growth of the number of such round trips, when gradually, but with increasing efficiency, the operating conditions of the self-exciting oscillator begin to manifest themselves: amplitude balance and phase balance.

Components with a nonlinear transfer function are necessary to limit and stabilize the oscillation amplitude, which facilitates the transition of the OEO to a stationary generation mode. One of such components is an electro-optical amplitude modulator built on the basis of an optical Mach-Zehnder interferometer. In this case, the positive quadrature point is usually selected as the operating point on the transfer function (Fig. 2). The phase shift $\delta\varphi$ induced by the electric voltage applied to the strip line allows controlling the result of light interference at the interferometer output – the output optical power P_{out} .

The fiber optic path, as a key element of the photonic line, determines the parameters of the resonator. Low losses in the photonic line allow implementing a long ring resonator for the OEO and, therefore, a high-Q factor. The width of the spectrum of an individual mode is inversely proportional to the square of the delay time in the feedback loop and the power introduced into the resonator [7]. In this case, the generation spectrum of a single-loop OEO is a series of modes

equally spaced from each other, since the intermode interval (free spectral range) in a loop with a long resonator is often significantly smaller than the passband of the used bandpass RF filter (Fig. 1), which leads to a multimode generation of the OEO [8, 9] (Fig. 3). This is the cause of one of the main OEO problems – the selection of longitudinal (spectral) modes in optical resonators to obtain a single-frequency generation mode – a single-mode generation. To suppress spurious modes in the OEO generation spectrum, various technical solutions are used [11]: several loops, injection locking, frequency modulation, optical amplifier, other types of resonators, exclude a bandpass RF filter and other solutions. Despite the fact that significant progress is achieved in the field of OEO development, the task of improving such OEO characteristics as the spectral purity of the microwave signal and its long-term frequency stability [10] remains relevant.

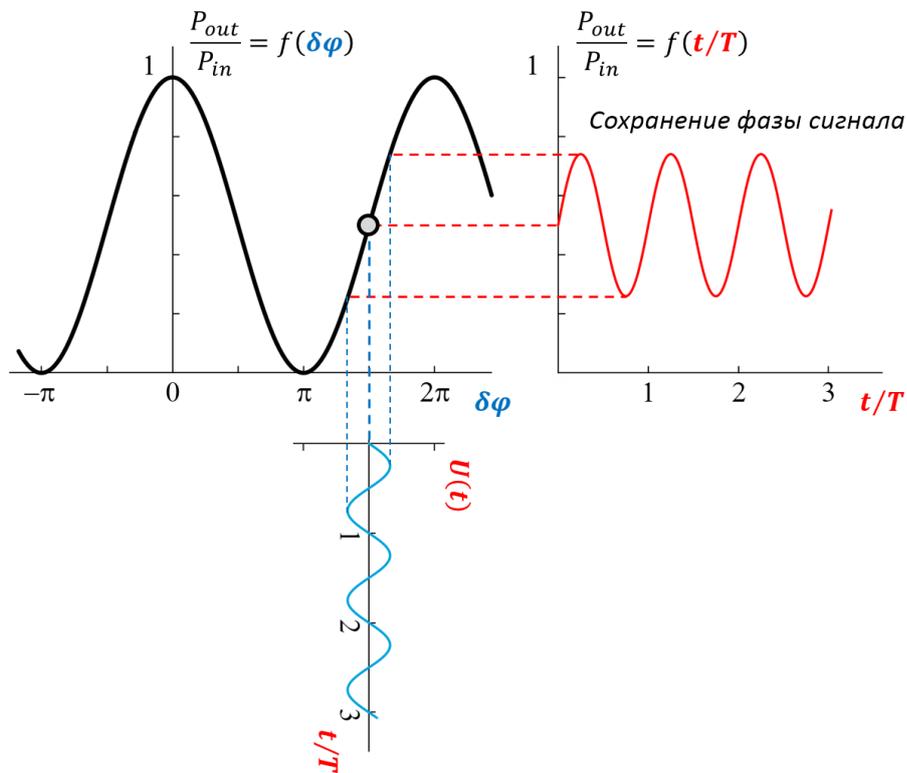


Fig. 2. An example of the transfer function of the Mach-Zehnder modulator. Input electrical (blue) and output optical (red) signals for a positive quadrature operating point

Understanding the noise sources and the causes of the noise transfer function formation is important for improving the OEO characteristics [12]. The generally accepted definition of phase noise $L(f)$ for OEO is the spectral power density (SPD) of the single-sided band of the generated microwave signal [13]. The SPD is normalized to the microwave signal power and is measured in dBc/Hz. The generator specification specifies the phase noise level at a certain offset frequency from the carrier. The use of a high-Q resonator makes it possible to reduce the phase noise of the OEO. In the single-mode generation, it is the mode width that determines the spectrum of the microwave signal. For example, using frequency modulation in the OEO loop, an ultra-low phase noise

level was achieved [14]: -160 dBc/Hz at an offset frequency of 10 kHz from a carrier frequency of 10 GHz.

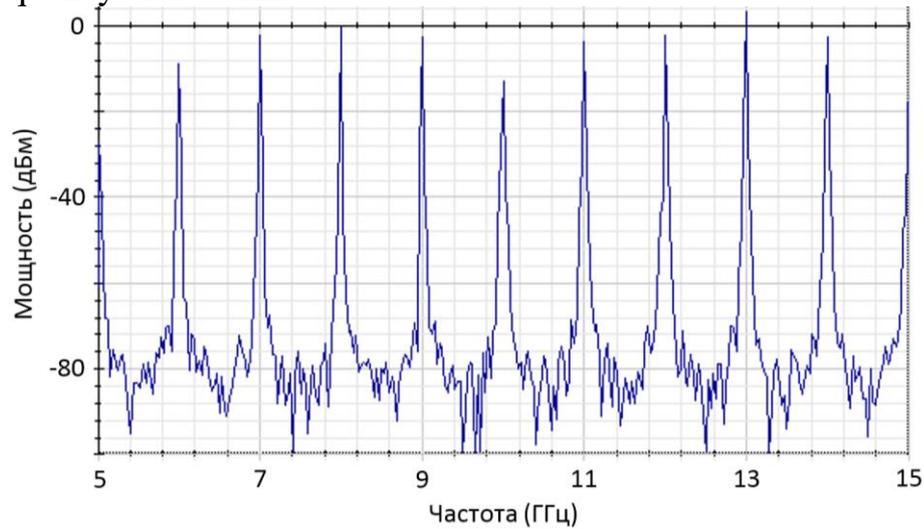


Fig. 3. Typical OEO generation spectrum with a 200 m loop length.
RF filter parameters: center frequency 10 GHz and bandwidth 10 MHz

For efficient design of radio photonic systems, it is necessary to perform a simulation experiment using computational photonics tools [15–17]. This allows simulating the operating conditions of devices and changing the characteristics of components over a very wide range, which is often impossible to do using physical models. Since physical tests and laboratory experiments in photonics and radio photonics require significant financial costs, modeling allows increasing the efficiency of developing the final product.

This paper presents the results of simulation experiments to study the operating modes of OEO models created using computational photonics tools. To obtain and study the single-frequency generation mode, OEO models of different types were created:

- dual-loop OEO;
- dual OEO with injection locking;
- coupled OEO with dual output.

When creating OEO models, special attention was paid not only to the selection of key components, their parameters and transfer functions, but also to global modeling parameters to increase frequency resolution. In addition, the models allow recording the time evolution of the OEO output microwave signal spectrum, reflecting the transition from the generation establishment mode to the quasi-stationary mode.

The models of a dual-loop OEO with resonators of different quality factors were studied as one of the methods for selecting longitudinal modes in optical resonators that use the summation of electrical and optical signals. It was found that the optimal ratio for reducing the level of side modes is 1:5 between the loop lengths. In this case, the level of side modes remaining in the spectrum is 45 dB lower than the main mode. It is shown that a decrease in the line width of the optical carrier generator radiation leads to a decrease in the phase noise of the output microwave signal, and the chromatic dispersion of the optical fiber

leads to the suppression of high-frequency modes, which indicates the need to compensate for the dispersion of the optical fiber when creating high-Q OEOs.

The study of the generation conditions and operating modes of dual-loop OEO models with direct, reverse and bidirectional injection locking was performed. It was found that in the OEO model with direct injection, the role of the master oscillator is to reduce the phase noise of the slave oscillator. With reverse injection, the role of the slave oscillator is to reduce the level of spurious modes in the generation spectrum of the master oscillator. The study of the OEO model with bidirectional injection locking with injection coefficients $\Gamma_{12} = \Gamma_{21} = 10\%$ (and pass coefficients of 90%) showed that the selection of resonator parameters in order to eliminate the coincidence of the central frequencies of the spurious modes of the master and slave oscillators while maintaining the same central frequencies for the selected modes leads to effective suppression of spurious modes and an increase in the dynamic range of the output microwave signals (Fig. 4).

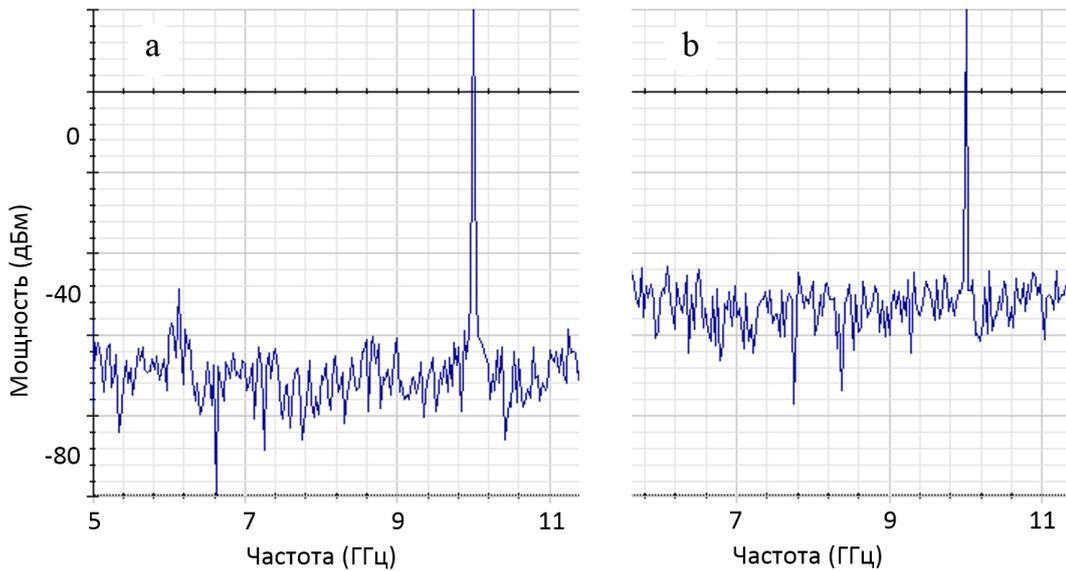


Fig. 4. OEO generation spectra with bidirectional injection locking: a master OEO with a loop length of 200 m (a) and a slave OEO with a loop length of 20 m (b)

Combining a ring fiber laser and an OEO into a uniform system allows the creation of a coupled generator with a dual output (Fig. 5), when optical pulses with high temporal stability and an RF signal with high spectral purity are simultaneously generated [18]. This technical solution involves the use of a ring fiber laser with active mode locking, which acts as an optical carrier generator, and an OEO, which acts as a clock generator for amplitude intracavity modulation of laser radiation.

A model of a coupled OEO with a dual output is created and its operating modes are studied. In the pulse generation mode, laser pulses with a Gaussian function shape of subnanosecond duration are obtained. The possibility of controlling the duration and repetition rate of laser pulses by varying the generation spectrum width of a ring fiber laser and the OEO frequency is studied. The time evolutions (from the number of resonator round trips) of the generation spectrum and the shape of laser pulses of a ring fiber laser with active

mode-locking are recorded, allowing one to trace the stages of the pulse generation mode formation.

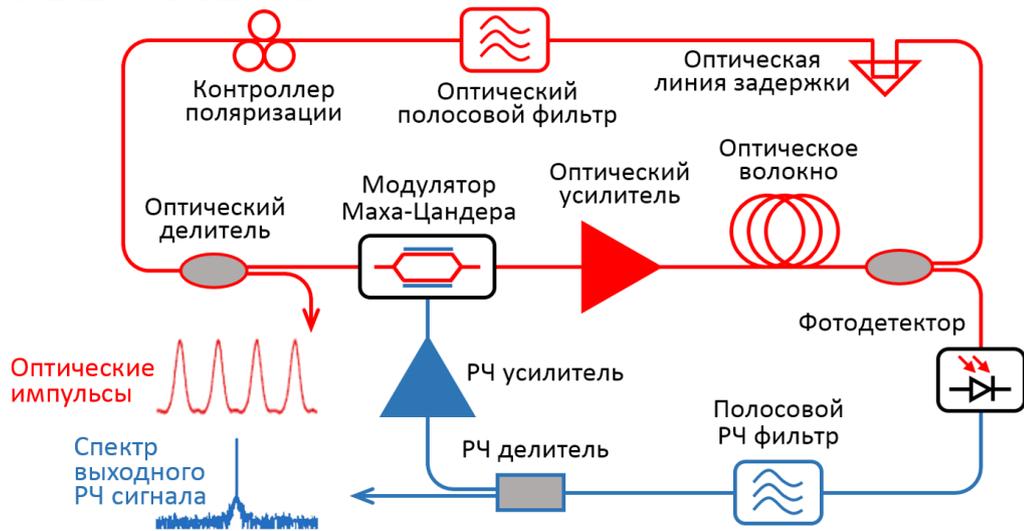


Fig. 5. Schematic diagram of a coupled OEO with dual output

1. A.J. Seeds, K.J. Williams, *Journal of lightwave technology*, **24**(12), 4628 (2006).
2. В. Урик, Д. МакКинни, К. Вилльямс, *Основы микроволновой фотоники*. М.: Техносфера, 2016.
3. M.E. Belkin, A.S. Sigov, *Journal of Communications Technology and Electronics*, **54**(8), 855 (2009).
4. P.S. Devgan, V.J. Urick, K.J. Williams, *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, 857 (2012).
5. A. Neyer, E. Voges, *Appl. Phys. Lett.*, **40**(1), 6 (1982).
6. V.V. Grigor'yants, A. A. Dvornikov, Yu. B. Il'in et al., *Optical and Quantum Electronics*, **17**(4), 263 (1985).
7. X.S. Yao, L. Maleki, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **32**(7), 1141 (1996).
8. L. Maleki, *IEEE*. 497 (2012).
9. P. Devgan, *ISRN Electronics*, ID 401969 (2013).
10. A. Liu, J. Dai, K. Xu, *Appl. Sci.*, **8**, 2623 (2018).
11. T. Hao, Y. Liu, J. Tang et al., *Advanced Photonics*, **2**(4), 044001 (2020).
12. E. Rubiola, *Phase noise and frequency stability in oscillators*, Cambridge University Press, 2012.
13. R. Navid, C. Jungemann, T. H. Lee et al., *Close-in phase noise in electrical oscillators*. In *Noise in Communication*, **5473** of *Proceedings of SPIE*, pp. 27–37, Maspalomas, Spain, May 2004.
14. D. Eliyahu, D. Seidel, L. Maleki, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **56**(2), 449 (2008).
15. E.C. Levy, O. Okusaga, M. Horowitz et al., *Optics Express*, **18**(20), 21461 (2010).
16. A.V. Loparev, *Scientific Bulletin of MIREA*, №2(9), 41 (2010).

17. A.S. Zadorin, A.A. Lukina, Proceedings of TUSUR University, **19**(4), 81 (2016).
18. X.S. Yao, L. Davis, L. Maleki, J. Light. Tech. **18**(1), 73 (2000).

SILVER HALIDES – ARE A PROMISING MATERIAL FOR FIBER IR-TECHNOLOGY

S.M. Pilyushko, M.S. Kuznetsov, K.S. Zarameskikh,
A.A. Pakhomova, A.R. Romanenko, G.V. Polyakova, L.N. Butina
*JSC „State Research and Design Institute
of Rare Metal Industry „Giredmet“, Moscow
E-mail: vorpat2402@bk.ru*

Optical fibers for the long-wavelength region of the spectrum are used in research and development, as well as in various fields of medicine and industry. The demand for power and wave optics in the medium and far infrared range continues to grow due to the constant development of such areas as space research, environmental monitoring, medical diagnosis, and treatment of diseases (including dental), synthesis of organic and pharmaceutical substances [1]. Silver halides and their compounds are promising among crystalline materials. They are transparent in the 10-micron region, slightly soluble, have a disinfecting effect, are safe for humans, have not only a wide spectral transmission range (from 2 to 20 microns), but also satisfactory strength qualities and chemical resistance [2]. The possibility of using optical fiber based on KRS-11 and KRS-13 is being studied based on the Giredmet JSC enterprise, where the technology for manufacturing single-crystal blanks from these materials is well developed [3].

Based on the results of the study, a system for monitoring the main parameters of a fiber made of silver halides was prepared. The main parameters of the manufactured optical fibers are obtained, such as: spectral transmission, spectral dependence of absorption, as well as the absorption index at a wavelength of 10,6 microns.

1. K.S. Zaramenskikh, M.S. Kuznetsov, L.N. Butvina, et al. Photon-express. **6 (174)**, 315-316 (2021).
2. L. Butvina, “Polycrystalline Fibers” in the book “Infrared Fiber Optics”, Edited by A.S. Sanghera, I.D. Aggarwal, CRC Press, Boca Raton, 1998, pp. 209-249.
3. S.M. Pilyushko, V.O. Umnov, M.S. Kuznetsov, et al. Lasers in science, technology, medicine: Collection of scientific papers of the XXXIII International Conference –M. – 2022, Volume **33**, pp. 102-106.

DEVELOPMENT OF POLYCRYSTALLINE CLADDING FIBERS

A.A. Yuzhakova, D.D. Salimgareev, A.E. Lvov, P.V. Pestereva,
I.V. Yuzhakov, L.V. Zhukova
*Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg
E-mail: l.v.zhukova@urfu.ru*

Mid-IR fiber optics are used in laser technologies, optoelectronics, spectroscopy, disease diagnostics, and thermography. However, the vast majority of these applications are based on the use of cladding optical fibers. Among halide fiber materials, cladding fibers based on the AgCl – AgBr system are known [1], with a relatively narrow transmission range of 2–18 μm and a short service life due to photosensitivity. A solution to this problem can be the development of IR fibers based on new materials of the AgBr – AgI, $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ and $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ systems, which can not only increase the range of spectral transmission, but they are also harder, photo- and radiation-resistant.

At the first stage, the properties of optical materials were analyzed and the propagation of radiation along the fibers was simulated. Based on these results compositions were selected that ensure the difference between the refractive indices of the core and cladding is no more than 0.01. Next, single crystals of a given composition were synthesized using the thermozone crystallization-synthesis and Bridgman methods. Single crystals for the cladding and core were subjected to chemical-mechanical processing, after which a blank for extrusion was made from them using the rod-in-tube method. This blank was placed in a container, a die with an internal diameter of 1120 μm , a plunger and auxiliary elements were installed, and all assembled equipment was placed in the POI-500 press. The blank was heated to 200 $^{\circ}\text{C}$, after which it was maintained at this temperature for 90 minutes to achieve high plasticity and was extruded. As a result, IR fibers with a length of 1.2–3.3 m and a diameter of 1120 μm were obtained. The fibers were placed in a fluoroplastic sheath and terminated with SMA connectors. The fibers showed spectral transmittance in the range of 3.5–27.0 μm without absorption windows. The minimum losses reached 0.2 dB/m.

The research funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Ural Federal University Program of Development within the Priority-2030 Program) is gratefully appreciation.

1. L.N. Butvina, E.M. Dianov, D.V. Drobot, et al., Proc. SPIE 1048, Infrared Fiber Optics 17-23(1989).

BISMUTH-DOPED FIBERS FOR E- AND S-BANDS CLADDING PUMPED AMPLIFIERS

D.I. Oleinik¹, A.A. Umnikov¹, A.N. Abramov¹, A.S. Vakhrushev²,
S.V. Alyshev², A.M. Khagai², E.G. Firstova², M.A. Melkumov², S.V. Firstov²

¹*G.G. Devyatikh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,
Nizhny Novgorod*

²*Prokhorov General Physics Institute of the RAS,
Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow
E-mail: od@ihps.ru*

Bismuth-doped fiber lasers and amplifiers are promising for obtaining lasing and amplification in a wide wavelength range of 1.1–1.8 μm . Depending on the composition of the core glass, bismuth-doped fibers exhibit different lasing characteristics, and in particular, fibers based on $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ glass are designed for the wavelength region 1360–1500 nm.

The fiber preforms were manufactured using all-gas-phase MCVD deposition technology. BiBr_3 was used as a bismuth precursor, which was thermostat controlled at a temperature of ≈ 185 $^\circ\text{C}$; He was used as a carrier gas. The profile of the light-guiding structure was formed by layer-by-layer deposition of $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ glass, where the concentration of the GeO_2 dopant was varied and the final refractive index profile of the core was close to a gradient one. Doping of the central part of the core with bismuth was carried out by a two-stage method, where a porous layer of $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ glass deposited by a reverse pass and then sintered in a BiBr_3 flow. After this, the tube with the deposited layers was collapsed in a flow of O_2 and CCl_4 to reduce the concentration of OH groups. The fibers with a core diameter of ≈ 30 μm and ≈ 60 μm were drawn from the manufactured preform.

The developed bismuth fibers can serve as the basis for creating a power amplifier operating in the E- and S-bands, which is capable of providing an output power of ≈ 1 W when using pumping multimode diodes at a wavelength of 808 nm.

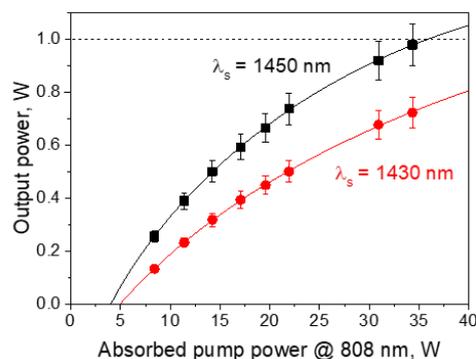


Fig.1. Dependences of output power on absorbed pump power for the amplifier based on the bismuth-doped fiber with the core diameter of ≈ 60 μm .

This investigation was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (IChHPS RAS, Russia, No. FFSR–2022–0005)

DYNAMICS OF FREQUENCY MODULATED PULSED RADIATION IN AN ACTIVE FIBER WITH LONGITUDINALLY VARYING DISPERSION

A.S. Abramov, V.A. Lapin, P.P. Mironov
S.P. Kapitsa Scientific Research Institute of Technology,
Ulyanovsk State University, Russia
E-mail: lva2013@yandex.ru

A method for obtaining amplification and temporal compression of frequency-modulated pulses in an active fiber with a dispersion-length dependence profile selected in such a way as to ensure maximum compression rates of pulses with a given initial chirp with constant amplification of the fiber is investigated.

The dynamics of the time envelope of the VP is described by the equation for the amplitude of the envelope of the type NLSE [1, 2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = gA \quad (1)$$

where $\tau = t - z/v_g$ – time in a running coordinate system, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – second order group velocity dispersion (GVD), R – Kerr's nonlinearity, g – fiber gain factor. In this work we considered a frequency modulated pulse:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}(\tau / \tau_0) \exp(i\alpha_0 \tau^2) \quad (3)$$

In the work, the GVD dependence was chosen [2]:

$$d_2(z) = -|d_{20}| \exp\left[-\frac{\alpha_0 |d_{20}|}{g_0} (\exp(2gz) - 1) + 2gz\right] \quad (4)$$

where α_0 – the initial pulse chirp. The paper considered a frequency modulated pulse:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}(\tau / \tau_0) \exp(i\alpha_0 \tau^2) \quad (5)$$

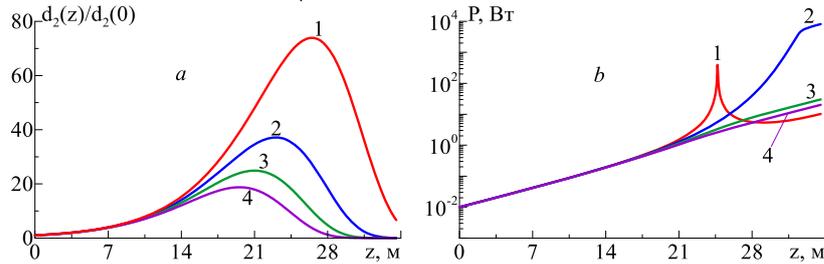


Fig. 1. The dependence of the normalized GVD (a) $d_2(z) = -|d_{20}| \exp\left[-\kappa (\exp(2g_0 z) - 1) + 2g_0 z\right]$ and peak power (b) at $\kappa = (0.5; 1; 1.5; 2) \cdot (\alpha_0 |d_{20}| / g_0)$ – curves (1-4).

The dependencies shown in Fig. show that the selected dependence is the best for the values of the calculated parameters used.

This work was support of the Russian Science Foundation in the framework of project № 23-22-00412.

1. G.P. Agrawal “Nonlinear Fiber Optics” (Elsevier, 2013).
2. A. Abramov et al., Photonics **9** (3), 160 (2022).

SPECTRA OF POLARIZATION DEPENDENT GAIN IN PHOSPHOSILICATE BISMUTH-DOPED FIBER AMPLIFIERS

A.V. Elopov¹, K.E. Riumkin¹, F.V. Afanasiev², S.V. Alyshev¹,
A.V. Kharakhordin¹, A.M. Khagai¹, E.G. Firstova¹, S.V. Firstov¹,
M.A. Melkumov¹

¹ Prokhorov General Physics Institute of the RAS,
Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow

² G.G. Devyatikh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,
Nizhny Novgorod

E-mail: elopov@fo.gpi.ru

Polarization dependent gain (PDG) was thoroughly studied in erbium-doped fiber amplifiers that are widely used in current telecommunication lines. Fiber optical lines with erbium amplifiers can accumulate around 4 dB gain difference which can cause deterioration of the performance of fiber optical line [1]. Despite the spreading of bismuth-doped fiber amplifiers (BDFA), this effect was not studied in such systems. However, it is anticipated that PDG effect is more significant in BDFA due to the higher anisotropy in bismuth active centers (BACs) than in erbium ions: 0.2-0.3 in BACs [2] against 0.6-0.7 for erbium [3].

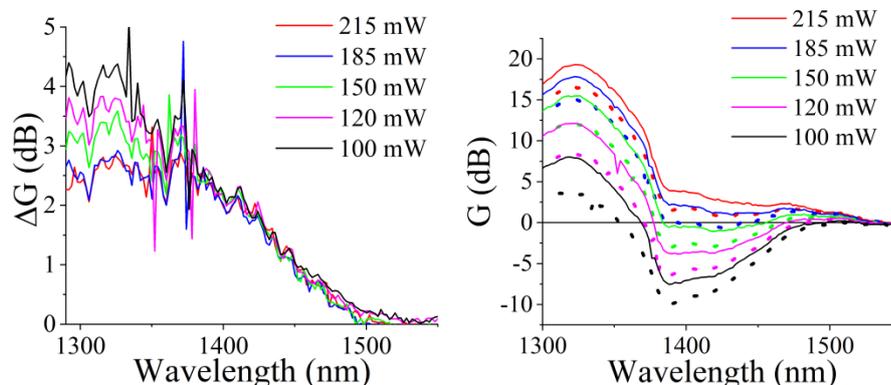


Fig. 1. PDG spectra (left) and small-signal gain for the case of parallel (solid line) and orthogonal (dotted line) relative orientation of pump and signal polarization (right) in phosphosilicate BDFA with different pump power.

In the paper we present PDG effect in BDFA based on phosphosilicate active fibers, Fig. 1.

This research was funded by Russian Scientific Foundation, grant number 22-79-00157, <https://rscf.ru/project/22-79-00157/>.

1. E. Lichtmann, *Electron. Lett.* **29**, 1969-1971 (1993)
2. A. V. Elopov, et al., *Photonics* **10**, 860 (2023)
3. L. O. Martinez-Martinez, et al., *REV MEX FIS* **59**, 302-308 (2013)

BISMUTH-ACTIVATED LOW-APERTURE OPTICAL FIBERS FOR INNER CLADDING PUMPING

A.N. Abramov¹, D.F. Burmistrov¹, M.V. Yashkov¹, A.S. Vakhrushev²,
A.V. Kharakhordin², S.V. Alyshev², S.V. Firstov², M.A. Melkumov²

¹ G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,
Nizhny Novgorod

² Prokhorov General Physics Institute of the RAS,
Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow
E-mail: denburmistrov2001@gmail.com

The development of efficient bismuth-doped double-clad optical fibers (OF) will make it possible to use high-power laser diodes for pumping, which, in turn, will significantly simplify their design, and, in the future, increase the output power of the devices based on such fibers.

In this paper, we present the results of our studies on the OF, drawn from a preform manufactured by the MCVD process, and having a glass core composition of Bi: GeO₂-F-SiO₂, with a small difference in the refractive indices of the cladding and the core, $\Delta n \sim 0.0015$, and the bismuth core absorption of 3 dB/m at 1400 nm. Due to the low level of Δn and the high concentration of BAC-Si, it was possible to increase the cladding absorption to the level of 0.55 dB/m at 820 nm for the fibers with the cutoff wavelength of $\sim 1.56 \mu\text{m}$, which facilitate single-mode laser generation in the region near $1.46 \mu\text{m}$.

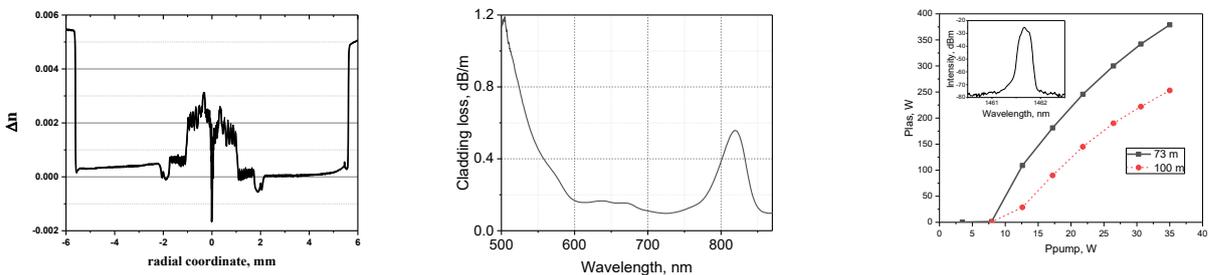


Fig. 1. Δn profile, cladding absorption, and output power of lasing.

BiBr₃ was used as a precursor of bismuth, and C₂F₃Cl₃ was used as a precursor of Δn -lowering fluorine. The difficulty of controlling the composition of glasses with fluorine, and as a result Δn , is due to the formation of volatile components such as GeF₄, POF₃ and SiF₄ during synthesis.

We made a double-clad optical fiber with a core diameter of $\sim 20 \mu\text{m}$ and an octagonal-shaped silica cladding having a diameter of $125 \mu\text{m}$. The laser properties of the fiber were tested in a linear cavity configuration cladding-pumped at 808 nm. The maximum pumping power introduced into the active fiber was 35 watts, which allowed to obtain $\sim 380 \text{ mW}$ laser radiation at 1461 nm. The absorption of the pump in the laser was more than 90 % for the optimal length of 73 m. The slope efficiency of the laser was quite low, $\sim 1.5\%$ with respect to the absorbed pump power. The reasons for the low efficiency are not completely clear. The work was carried out within the framework of The State Assignment for the Institute of Chemical Engineering of the Russian Academy of Sciences № FFSR-2022-0005 and supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 22-19-00708).

Новые функциональные материалы

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНЫЕ СТЕКЛА ДЛЯ ЗАДАЧ ФОТОНИКИ: ИСТОРИЯ, СВОЙСТВА, ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЯ (ОБЗОР)

Н.В. Никоноров

*Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург
E-mail: nikonorov@oi.ifmo.ru*

Фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла – это новый класс многофункциональных фоточувствительных материалов, предназначенный для создания широкого спектра элементов и устройств фотоники: объемных фазовых голограмм (брэгговских решеток), градиентных элементов, волноводных и полых микрофлюидных структур, люминофоров, сенсоров, лазеров с распределенной обратной связью и т.д. [1, 2].

Прототипом ФТР стекол явилось полихромное стекло (ПХС), разработанное Stookey S. в американской компании Corning в 1978 г. [3]. В России эти стекла появились позже (в 80-е годы). Разработчиком этих стекол была группа Цехомского В. (ГОИ им. С.И. Вавилова, СССР). Эти стекла имели тот же функционал что и ПХС и получили похожее название «мультихромные стекла» (МХС) [4]. Главная особенность ПХС/МХС – селективное поглощение света в видимой области спектра. Широкую гамму окрасок эти стекла приобретают в результате следующих фотохимических и диффузионных процессов (фото-термо-индуцированной кристаллизации). Под действием УФ излучения и последующей термической обработки образуются центры кристаллизации – металлические наночастицы серебра, и на этих центрах происходит рост нанокристаллов NaF-AgBr. При определенных условиях фото-термо-индуцированного роста эти нанокристаллы приобретают сложную форму в виде вытянутых конусообразных структур, похожих на «морковки». Дополнительное многостадийное УФ облучение и термообработка приводят к фотолитическому осаждению серебра (декорированию) на вытянутых структурах. Металлическое серебро, осажденное на поверхность нанокристалла в виде оболочки, также приобретает конусообразную форму, что приводит к сдвигу полос поглощения в видимой области спектра. Таким образом, основным условием полихромного/мультихромного окрашивания является конусообразная форма металлических наночастиц серебра. Таким образом в объеме стекла формируется разнообразная окраска, включая полную гамму цветов: синего, зеленого, желтого, оранжевого, красного и их производных, что позволяет записывать в стекле цветное изображение. На рис. 1 показана фотография многоцветного изображения, записанного в объеме МХС, синтезированного в университете ИТМО [1]. Следует отметить, что несмотря на привлекательность записи цветного изображения в объеме стекла только при помощи УФ излучения и термообработки, ПХС и МХС пока до сих пор не нашли какого-либо широкого применения.

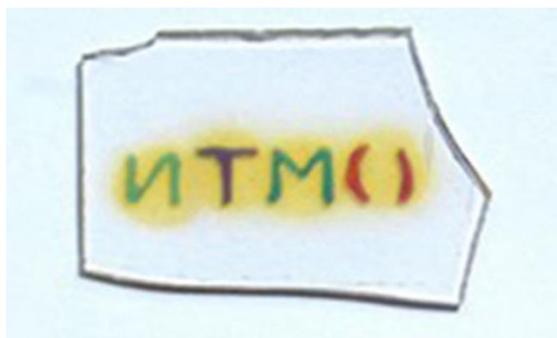


Рис.1. Многоцветное изображение, сделанное УФ лазером (325 нм) последующей термообработкой в объеме стекла [1].

В конце 80-х начале 90-х годов Никоноров Н. и Глебов Л. (ГОИ им. С.И. Вавилова) впервые предложили использовать ПХС/МХС для записи объемных фазовых голограмм [5-8]. В этом случае использовалась только одна стадия фото-термо-индуцированной кристаллизации стекла – «облучение и термическая обработка», при которой основное внимание уделялось не конусообразной форме микрокристаллов и сдвигу спектров поглощения, а различию в показателях преломления кристаллической и стеклообразной фаз. Это различие было использовано для записи объемных фазовых голограмм, в том числе брэгговских решеток. Более того, с конусообразной формой велась «борьба», чтобы уменьшить размер нанокристаллов и ослабить вклад рассеяния в записанных фазовых голограммах. Таким образом, в ГОИ был предложен новый брэнд этому классу голографических материалов – «фото-термо-рефрактивные стекла» (ФТР-стекла), т. е. стекла, в которых изменяется показатель преломления в результате облучения и последующей термической обработки. Это название закрепилось в голографическом сообществе, оно вытеснило названия ПХС и МХС и стало активно использоваться у нас в стране [1, 2] и за рубежом [9].

На протяжении последних 20 лет две научные группы Университета ИТМО (Санкт-Петербург, Россия) и компании Optigrate (Орландо, США) вели и в настоящее время ведут конкурентные исследования и разработки как самого ФТР стекла, так и элементов и устройств фотоники, сенсорики, лазерной техники, люминофоров и т.д. Повышенное внимание к ФТР стеклам прежде всего обусловлено их физико-химическими свойствами и возможностью изготавливать объемные дифракционные оптические элементы разного функционального назначения.

Можно отметить следующие достоинства ФТР стекол и голограмм на их основе [1, 2]. Голограммы (в том числе, брэгговские решетки) могут быть записаны на большой глубине (0.1 – 10 мм). Записанные элементы имеют высокую дифракционную эффективность (до 99,9%), а также угловую (менее 0.1 мрад) и спектральную (менее 0.01 нм) селективность. Голограммы, записанные в ФТР стекле, обладают высокой химической устойчивостью, механической и термической прочностью, которые близки коммерческому оптическому стеклу К8. Кроме того, они выдерживают воздействие мощного непрерывного и импульсного лазерного излучения.

Пороги оптического пробоя ФТР стекла близки к порогам пробоя коммерческого оптического стекла ВК7: 30–40 Дж/см² при импульсном облучении (8 нс, $\lambda = 1064$ нм) и 100 кВт/см² при непрерывном облучении ($\lambda = 1095$ нм). Также стоит отметить, что голограммы могут выдерживать многократный нагрев до высоких температур (500°C) без потери своих свойств [1, 2].

Достоинством ФТР стекол, как материала для записи голограмм, также является его однородность (флуктуации показателя преломления в объеме порядка 10^{-5}) и воспроизводимость характеристик как при синтезе исходного стекла, подобно оптическому стеклу К8, так и при фото-термоиндуцированной кристаллизации. ФТР стекла допускают применение традиционных методов механической обработки – шлифование и полирование, а также разнообразные технологии формования (например, прессование, молирование и создание асферических поверхностей). Также возможна вытяжка оптического волокна из ФТР стекла. Изготовление ФТР стекла можно осуществлять как в лабораторных (до 5-10 кг), так и в промышленных (до 300 кг) условиях с использованием простой и нетоксичной технологии. При этом химические реактивы, необходимые для синтеза стекла, являются коммерчески доступными и недорогими.

Следует также отметить некоторые необычные для регистрирующих сред свойства ФТР стекол. Так, ФТР стекла содержат щелочную компоненту (ионы натрия), и к таким стеклам применима ионообменная технология. Например, возможно заменять ионы натрия в ФТР стекле на ионы серебра, калия, рубидия, цезия из внешнего источника – расплава соли. Эта технология позволяет повышать показатель преломления ($\Delta n = 10^{-3}$) на поверхности ФТР стекла и создавать ионообменные оптические Ag^+ , K^+ , Rb^+ и Cs^+ волноводы, а также упрочнять поверхность за счет сжимающих диффузионных напряжений [1, 10]. Ионообменная технология позволяет повышать механическую, термическую и оптическую прочность ФТР стекла, а также его химическую устойчивость.

В работе [11] показано, что скорость травления закристаллизованной области материала в 10-15 раз выше скорости травления исходного стекла. Этот эффект позволяет создавать трехмерные мини- и микрофлюидные структуры в объеме ФТР стекла.

В работе [12] показана возможность легирования ФТР стекол редкоземельными ионами (неодимом, иттербием, эрбием), что открывает возможность записи брэгговских решеток непосредственно внутри активной среды, т.е. позволяет создавать лазеры с распределенными брэгговскими отражателями и с распределенной обратной связью.

Следует отметить еще одну интересную особенность ФТР стекла. В состав ФТР стекла входят ионы серебра. При облучении УФ излучением и последующей термообработки при невысоких температурах (ниже T_g) в ФТР стекле формируются серебряные молекулярные кластеры, которые люминесцируют в видимом диапазоне спектра под действием УФ

излучения. Такой подход позволяет распределять люминесцентные центры в объеме ФТР стекла и соответственно получать люминесцентное изображение, т.е. можно создавать люминесцентные рисунки сложной архитектуры.

Ионы серебра также можно вводить в поверхностные слои ФТР стекла ионным обменом с последующим формированием серебряных молекулярных кластеров при термообработке. Этот подход позволяет создавать люминесцентные волноводы [13].

Серебряные ионы также могут быть трансформированы в серебряные металлические наночастицы путем УФ облучения и последующей термообработки при высоких температурах (близко к T_g). Такие плазмонные структуры могут быть использованы для создания малогабаритных дешевых сенсоров для химического и биологического детектирования. Эти сенсоры основаны на поверхностно-усиленном рамановском рассеянии (SERS) при использовании плазмонных наночастиц.

Серебряные металлические наночастицы можно также формировать на поверхности ФТР стекла ионным обменом. Такой подход позволяет создавать плазмонные волноводы для фотокаталитических применений, например, для разложения воды на водород и кислород, а также для очистки воздуха и воды от загрязнений.

Важным фактором является то, что ФТР стекло позволяет реализовывать комбинацию фото-термо-индуцированной кристаллизации, ионного обмена и травления. Т.е. возможно создание оптических, люминесцентных и плазмонных волноводов как на поверхности ФТР стекла, так и внутри полых структур.

Отмеченные особенности ФТР стекол позволяют его отнести к многофункциональным материалам и разрабатывать на его основе широкий спектр голографических оптических элементов и устройств для фотоники, лазерной техники и метрологии.

Можно отметить вклад компаний Optigrate (в 2018 г. эта компания вошла в состав IPG, США) и Ondex (США) в создании коммерческого производства дифракционных оптических элементов для лазерной техники на основе ФТР стекла. Прежде всего это производство и выпуск на рынок широкой линейки сверхузкополосных спектральных и пространственных фильтров, WDM устройств, комбайнеров мощных лазерных пучков, чирпированных решеток для компрессии световых импульсов, фильтров повышающих спектральную яркость лазерных диодов, фильтров для стабилизации длины волны лазерных диодов и т.д. [14].

Университет ИТМО также внес существенный вклад в разработку самого ФТР стекла и элементной базы нового поколения для задач фотоники. К таким разработкам, прежде всего, можно отнести изучение процессов фото-термо-индуцированной кристаллизации и механизмов изменения показателя преломления классического «фторидного» ФТР

стекла [1]. Эти исследования легли в основу создания новых ФТР стекол. К ним можно отнести разработку «бромидных» и «хлоридных» ФТР стекол, у которых изменение показателя преломления положительное, по сравнению со «фторидными» ФТР стеклами, имеющих отрицательное изменение показателя преломления.

Университет ИТМО воспроизвел [1] практически всю линейку голографической продукции, производимой компаниями Optigrate [14] и Ondex. Следует также отметить следующие дополнительные разработки:

1. сверхузкополосные спектральные фильтры с шириной полосы 5 пм для повышения спектральной яркости и температурной стабилизации длины волны излучения лазерных диодов (совместно с ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН);

2. голографические призмы на основе мультиплексных брэгговских решеток (более 20 решеток, записанных в единичном объеме) для калибровки высокоточных угловых приборов (совместно с концерном «ЦНИИ «Электроприбор»);

3. изображающие голографические метки для коллиматорных голографических прицелов;

4. базовые элементы для очков дополненной реальности на основе подхода монолитной интеграции волноводной пластины из ФТР стекла с записанными в ней мультиплексными голограммами для ввода и вывода информации (совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана);

5. люминесцентные волноводы и датчики температуры;

6. плазмонные волноводы, SERS сенсоры для химического и биологического детектирования, фотокатализаторы;

7. на лазерных ФТР стеклах, активированных неодимом, эрбием и иттербием получена генерация, что открывает возможности реализации в стекле идеологии монолитной интеграции брэгговских решеток и лазерной среды, по аналогии с полупроводниковыми лазерами с распределенной обратной связью.

Таким образом, можно заключить, что многофункциональные ФТР стекла имеют большой потенциал как голографическая, ионообменная, люминесцентная и лазерная среда, и, несомненно, такие материалы будут востребованы при создании элементов и устройств фотоники нового поколения.

Работа проводилась при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-19-00559.

1. N. Nikonorov, S. Ivanov, E. Musikhina, *Optical Journal*, **90**, №3, 68 (2023).

2. N. Nikonorov, S. Ivanov, V. Dubrovin, et al. *Holographic materials and optical systems*, InTech, (2017).

3. S.D. Stookey, G.H. Beal, J.E. Pierson, *J. Applied Physics*. **49**, №.10, 5114 (1978).

4. E.I. Panysheva, I.V. Tunimanova, V.A. Tsekhomskii, *Physics and Chemistry of Glass*, **16**, №. 2, 239 (1990).
5. L.B. Glebov, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, I.V. et al., *Proceedings of VII All-Union Conference on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials*, Riga: Latv.SSR, **2**, 527 (1989).
6. L.B. Glebov, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, et al., *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, **314**, № 4, 849 (1990).
7. S.A. Kuchinskii, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, et al., **70**, № 6, 1296 (1991).
8. L.B. Glebov, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, et al., *Optics and Spectroscopy*, **73**, № 2, 404 (1992).
9. O.M. Efimov, L.B. Glebov, L.N. Glebova, et al., *Applied Optics*, **38**, № 2, 619 (1999).
10. Y.M. Sgibnev, N.V. Nikonorov, V.N. Vasilev, et al., *Journal of Lightwave Technology*, **33**, № 17, 3730 (2015).
11. Y. Sgibnev, N. Nikonorov, A. Ignatiev, et al., *Optics Express*, **24**, № 5, 4563 (2016).
12. V. Aseev, V. Nikonorov, *J. Optical Technologies*, **75**, 676 (2008).
13. Y. Sgibnev, B. Asamoah, N. Nikonorov, et al., *Journal of Luminescence*, **226**, 117411 (2020).
14. <https://www.optigrate.com>

ФАЗОВЫЕ НАНОНЕОДНОРОДНОСТИ В ОКСИДНЫХ СТЕКЛАХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Г.Ю. Шахгильдян, В.Н. Сигаев

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

E-mail: georgiy.shahgildyan@gmail.com

Фазовые нанонеоднородности, значительно отличающиеся по составу и структуре от окружающей их стеклообразной матрицы, оказывают существенное влияние на ее свойства. Особое значение формирование фазовых нанонеоднородностей имеет для разработки новых оптических материалов на основе оксидных стекол, способных проявлять специфические нелинейно-оптические, спектрально-люминесцентные и другие свойства. Направленное формирование фазовых нанонеоднородностей в стеклах открывает новые возможности для создания оптических материалов с управляемыми, а иногда и не свойственными стеклу свойствами. Однако, несмотря на значительное количество исследований, посвященных созданию новых оптических материалов на основе стекла и моделированию их структуры [1], до сих пор отсутствует полноценное описание типологии этих неоднородностей и методов их формирования. В данной работе представлен обзор фазовых нанонеоднородностей, направленное формирование которых будет способствовать созданию оптических материалов с заданными свойствами и необычными их комбинациями.

I. Явление стабильной и метастабильной ликвации в стеклообразующих оксидных системах, известное многие десятилетия, всегда привлекало внимание как объект исследований, предшествующий возникновению других функциональных фазовых неоднородностей (в виде нано- и микрокристаллов или нанопор). Современные исследования показывают, что ликвация сама по себе может приводить к формированию фазовых неоднородностей, влияющих на свойства оптических материалов. Например, в работах [2-3] продемонстрировано значительное повышение механических свойств (предел прочности, микротвердость и др.) оптически прозрачных стекол благодаря термоиндуцированному формированию ликвационной структуры. Аморфные фазовые нанонеоднородности, сформированные в стеклах систем $Me_2O-Nb_2O_5-SiO_2$ ($Me = Li, Na, K$), $K_2O-TiO_2-P_2O_5$ и других, придают оптическим материалам нелинейно-оптические свойства, проявляющиеся в генерации второй гармоники [4-6], а в работе [7] показано, что слабая квадратичная оптическая нелинейность вообще характерна для стекол, ликвидировавших в наномасштабе. Инициирование ликвации в стеклах системы $ZnO-Al_2O_3-SiO_2$ с добавками $AuCl_3$ позволяет управлять положением полосы локализованного плазмонного резонанса формирующихся наночастиц золота, обеспечивая сдвиг максимума полосы в диапазоне до 1000 нм [8]. Этот эффект

достигается за счет локализации наночастиц в ликвационных областях, изменяющих характер поведения поверхностных плазмонов в наночастицах золота и способствующих уширению спектра плазмонного резонанса.

II. Формирование нанокристаллов различной природы в стеклах является одним из наиболее распространенных методов создания функциональных фазовых нанонеоднородностей, обеспечивающих новые свойства стекол и их тонкую настройку. Классическим подходом является нашедшая широкое применение ситалловая технология, которая позволяет получать широкий спектр стеклокристаллических материалов, в том числе и прозрачных, и, в частности, формировать в объеме стекла диэлектрические, полупроводниковые или металлические нанокристаллы [9], причем модифицированием состава стекла можно существенно управлять свойствами материала. Например, добавки до 4,5 мол.% Al_2O_3 в галлиево-германосиликатное стекло значительно влияют на формирование нанокристаллов $\gamma-Ga_2O_3$, увеличивая их концентрацию и «замораживая» их размеры, что приводит к многократному увеличению интенсивности люминесценции материалов [10]. Классическим примером влияния катализаторов кристаллизации (TiO_2 , ZrO_2) на формирование фазового состава и свойств ситаллов являются ситаллы на основе системы $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$. Именно добавки катализаторов обеспечивают возможность зарождения и роста целевых эвкрипитоподобных фаз и тонкого контроля за значениями коэффициента температурного расширения в ситаллах системы $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ [11-12]. Локальный, пространственно-селективный нагрев стекол с помощью фемто- и пикосекундных лазерных пучков позволяет формировать функциональные нанокристаллы в заданной области, открывая пути для создания волноводных и трехмерных фотонных структур в объеме стеклообразной матрицы. В работах [13-14] установлено, что в объеме стекла прямой лазерной записью могут быть сформированы кристаллические волноводы, генерирующие вторую оптическую гармонику. Недавно была показана возможность лазерного формирования в стекле перовскитоподобных нанокристаллов, химический состав которых варьируется в зависимости от режима лазерной обработки. Это позволяет настраивать положение максимума полосы люминесценции в диапазоне от 470 до 700 нм [15], создавая микроразмерные светодиоды и дисплеи высокого разрешения. Точечное формирование наноразмерных дефектов различной природы открывает возможности для разработки методов сверхплотной многоуровневой многослойной записи и неограниченно длительного хранения данных в стеклах, а также формирования в объеме стекол функциональных устройств, таких как микро-конвертеры поляризации [16-17]. Спектрально-люминесцентные свойства, инициируемые локально при образовании фазовых нанонеоднородностей в виде кластеров, наночастиц металлов или квантовых точек [18], открывают пути к многомерному кодированию данных с

использованием различных разрядностей интенсивности люминесценции наноструктур. Например, недавно была продемонстрирована возможность создания оптической памяти путем лазерной записи кластеров серебра в боратном стекле с емкостью более 10 Гб/см^3 [19].

III. Пористость, обычно не свойственная стеклам, также может рассматриваться как функциональная фазовая нанонеоднородность, значительно влияющая на свойства оптических материалов. Формирование наночастиц серебра или золота в порах нанопористых силикатных стекол открывает возможность создания эффективных подложек для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния, используемой для детектирования сверхмалых концентраций веществ [20]. Осаждение ионов переходных металлов в порах позволяет при последующей температурной консолидации формировать оксидные стекла с высоким содержанием активаторов [21]. Нанопоры играют важную роль в задачах лазерной записи функциональных объектов: денсификация пористой структуры позволяет создавать волноводные архитектуры с высоким пространственным разрешением [22], а возможность быстрого и воспроизводимого формирования наноструктур с высокими значениями фазовой задержки делает пористое стекло перспективным кандидатом для записи и хранения данных [23].

Приведенные примеры демонстрируют перспективы использования фазовых нанонеоднородностей для создания новых оптических материалов с самыми различными сочетаниями свойств. При этом, несмотря на описанные потенциальные преимущества, стекла с фазовыми неоднородностями остаются сложным с технологической точки зрения объектом, противоречащим основам оптического материаловедения, требующим от материала максимально высокой степени однородности в макро-, мезо- и микромасштабе. Однако, неоднородности структуры в наномасштабе во многих случаях могут не влиять сколько-нибудь заметно на свойства оптического материала, привнося в него дополнительные функциональности. В этой связи опыт промышленного освоения прозрачных ситаллов на основе системы $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, а также опыт промышленного производства фототерморефрактивных стекол с нанокристаллами серебра, демонстрирует возможность масштабирования подходов к производству стекол, содержащих фазовые нанонеоднородности. Все более глубокое понимание процессов их формирования и разработка прецизионных методов инициирования и контроля их роста составляет одну из актуальных задач современного оптического материаловедения.

1. K A. Kirchner et al. Chem. Rev. **123(4)**, 1774-1840 (2022).
2. Q. Zhang et al. J. Non-Cryst. Solids. **595**, 121806 (2022)
3. G.G. Santos et al. J. Am. Ceram. Soc. **106(1)**, 596-612 (2022).
4. V.N. Sigaev et al. J. Non-Cryst. Solids. **306(3)**, 238-248 (2002).

5. V.N. Sigaev et al. *J. Non-Cryst. Solids*. **292(1-3)**, 59-69 (2001).
6. V.N. Sigaev et al. *Integr. Ferroelectr.* **61(1)**, 249-253 (2004).
7. V.N. Sigaev et al. *J. Non-Cryst. Solids*. **306(3)**, 238-248 (2002).
8. G.Yu. Shakhgildyan et al. *Ceramics*. **7(2)**, 562-578 (2024).
9. Q. Pan et al. *Prog. Mater. Sci.* **130**, 100998 (2022).
10. N.V. Golubev et al. *Ceram. Int.* **49(2)**, 1657-1666 (2022).
11. I. Mitra *Opt. Mater. Express*. **12(9)**, 3563-3576 (2022).
12. A.S. Naumov et al. *Ceramics*. **7(1)**, 1-14 (2023).
13. A.S. Lipatiev et al. *Cryst. Growth Des.* **17(9)**, 4670-4675 (2017).
14. A. Stone et al. *Mater. Des.* **146**, 228-238 (2018).
15. K. Sun et al. *Science*. **375(6578)**, 307-310 (2022).
16. Y. Shimotsuma, et al. *PRL*. **91(24)**, 247405 (2003).
17. S.S. Fedotov, et al. *Appl. Phys. Lett.* **108(7)**, (2016).
18. G.Yu. Shakhgildyan et al. *Ceram. Int.* **47(10)**, 14320-14329 (2021).
19. A.S. Lipatiev et al. *ACS Appl. Nano Mater.* **5(5)**, 6750-6756 (2022).
20. A.S. Pshenova et al. *Plasmonics*. **14(1)**, 125-131 (2019).
21. E.A. Plastinin et al. *J. Non-Cryst. Solids*. **579**, 121369 (2022).
22. Z. Lijing et al. *Nanomaterials*. **11(1)**, 123 (2021).
23. S.S. Fedotov et al. *Opt. Lett.* **45(19)**, 5424-5427 (2020).

НОВЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ И ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОТОНИКИ

О. Б. Петрова

*Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева, Москва
E-mail: petrova.o.b@mustr.ru*

Органические полупроводниковые материалы в последние 10 лет стремительно расширяют области применения. Самый большой прогресс наблюдается в области электролюминесцентных материалов для устройств отображения информации – OLED (ОСИД) дисплеев, осветителей, умных OLED-тканей.

Требования к стабильности спектральных и яркостных характеристик как от партии к партии, так и во время эксплуатации оказалось возможно выполнить только тогда, когда органические полупроводники приблизились по химической чистоте к 5N, что на сегодняшний день является нижней планкой для неорганических полупроводников. Анализ динамики развития высокочистых полупроводниковых материалов показал, что неорганическим полупроводникам потребовалось около 40 лет, чтобы заместить 5N-ые препараты на более высокочистые. По этому показателю органические полупроводники находятся в начальной стадии своего развития. Кроме чистоты по примесям очень важными параметрами оказались наличие изомеров и полиморфизма. Различные полиморфные модификации могут проявлять люминесценцию с разной длиной волны и интенсивностью [1].

Одними из самых распространенных люминесцентных материалов для ОСИД-устройств являются металлокомплексы с различными органическими лигандами. Стоит отметить, что зарубежная литература относит подобные соединения к неорганической химии, а в нашей стране отнесение еще не устоялось, но склоняется к такому же.

Люминесцентные металлокомплексы можно разделить на комплексы с лиганд-центрированной и металл-центрированной люминесценцией. Комплексы с лиганд-центрированной люминесценцией обычно обладают широкими полосами люминесценции, вызванными переходами между нижней свободной молекулярной орбиталью (НСМО, *LUMO lowest unoccupied molecular orbital*) и высшей занятой молекулярной орбиталью (ВЗМО, *HOMO, highest occupied molecular orbital*). Такие комплексы содержат одинаковые или неодинаковые лиганды, и самыми известными из них являются 8-оксихиноляты металлов I, II и III групп таблицы Менделеева. В комплексах с металл-центрированной люминесценцией осуществляется безызлучательная передача энергии с лигандов на возбужденные электронные уровни центрального иона металла, а затем люминесценция, характерная для данного иона. Такое явление получило название «антенна-эффект». Среди металл-центрированных люминофоров можно выделить комплексы Eu^{3+} , обладающие красной люминесценцией.

С целью увеличения разрешенности люминесцентных переходов в редкоземельных ионах комплексы стараются получать несимметричными, т.е. содержащими различные по донорно-акцепторной природе лиганды [2].

Одной из проблем массового применения металлокомплексных материалов в фотонике является их меньшая, чем у неорганических люминофоров, стабильность в окружающей среде. Одним из способов защиты является создание гибридных материалов (ГМ), объединяющих органические и неорганические вещества на молекулярном уровне. ГМ содержат либо неорганические наночастицы в органической, например, полимерной матрице, либо, наоборот, ансамбли органических нанокластеров в неорганической матрице [3]. По этому признаку их классифицируют на неорганоганические и органо-неорганоганические, соответственно [4].

Органо-неорганоганические гибридные материалы широко применяются в новых приборах пассивной, активной и интегральной оптики и фотоники [5]. Основные исследования гибридных материалов посвящены внедрению органических функциональных наноконпонентов в такие неорганические матрицы как силикатные стекла, наносферы из оксида кремния, тонкие аморфные пленки, ксерогели, слоистые двойные гидроксиды, монокристаллы. Наиболее перспективным видится использование люминесцирующих координационных металл-комплексов, особенно на основе РЗЭ. Сравнение люминесцентных свойств ГМ, легированных органическими комплексами соответствующих элементов (Nd, Eu, Tb, Sm), с такими же материалами, в которые добавки вводили в виде неорганических соединений, показали значительное увеличение эффективности.

Основными методами создания ГМ являются растворные методы, в первую очередь, золь-гель [6], рост из раствора неорганических кристаллов с захватом органического компонента, темплатный синтез, а также газофазные методы – вакуумное осаждение, атомно-последовательное осаждение. На кафедре химии и технологии кристаллов РХТУ разработали несколько оригинальных методов получения ГМ:

1. Расплавная методика. Эта методика была опробована на широком ряду люминофоров как δ -оксихинолятах, так и на β -дикетонатах металлов, отдельных органических лигандах и матрицах легкоплавких фтороборатных свинцовых стекол. Методика состоит в помещении люминофора в расплав стекла, при этом люминофор подвергается кратковременному (10–30 с) высокотемпературному (500–550 °С) воздействию без доступа кислорода, что приводит к частичной деструкции органического компонента и обменной реакции с элементами стекла [7].

2. Напыление тонких слоев и последующая лазерная обработка. Эта методика опробована в основном на три-(δ -оксихиноляте) алюминия Alq_3 и матрицах V_2O_5 , PbF_2 , PbO . Обработка проводилась как непрерывным, так и импульсным фемтосекундным лазером. Люминофор подвергается

нагреву при вакуумном термическом напылении, а затем лазерному воздействию. При низких энергиях лазера происходит обменная реакция, а при больших – разрушение тонкой пленки [8].

3. Соосаждение из водно-спиртовых растворов. Этот метод опробован на широком ряду люминофоров и матриц LiF , PbF_2 , BaF_2 , SrF_2 , CaF_2 , ZnF_2 , LaF_3 , $\text{PbF}_2\text{-YF}_3$, $\text{PbF}_2\text{-LaF}_3$, $\text{PbF}_2\text{-YbF}_3$, $\text{CaF}_2\text{-YF}_3$ и др. Соосаждение проводилось фтороводородной кислотой и фторидом аммония из растворов растворимых солей соответствующих металлов и органических компонентов. Температурное воздействие в этом методе минимальное, но присутствует воздействие химически агрессивной среды, которое может приводить к встраиванию функциональных групп в органические фрагменты (фторирование, нитрование) [9].

4. Твердофазный синтез. Опробован на 8-оксихинолятах лития Liq и цинка Znq_2 и др. и матрицах PbF_2 , PbO , CaF_2 , ZnO , LaF_3 , $\text{PbF}_2\text{-YF}_3$, $\text{PbF}_2\text{-LaF}_3$, $\text{PbF}_2\text{-YbF}_3$. Этот метод позволяет варьировать температуру и время обработки, и приводит к такой же обменной реакции с получением тех же оптических центров, что и другие методики [10].

5. Аэрогель метод. Деструкция (осмоление) органического компонента в золь-гель процессе происходит, в основном, во время длительной сушки геля. Сушка в сверхкритических условиях позволяет провести процесс заметно быстрее. Такая сушка позволяет получить новый материал – аэрогели с экстремально развитой пористостью. Получение люминесцентных аэрогелей открывает широкие возможности их использования в качестве эффективных источников рассеянного света. ГМ были получены на основе SiO_2 -аэрогеля и 8-оксихинолятов алюминия Alq_3 , бора Bq_3 , кальция Caq_2 , β -дикетонатов Eu и Yb . Полученные аэрогели проявляют эффективную люминесценцию во всем видимом диапазоне (позволяют создать RGB устройство) и в ИК [11].

6. Капиллярный метод. Методы жидкофазного нанесения тонких пленок более экономичны, чем методы вакуумного напыления, и позволяют наносить пленки большой площади: это методы окунания, центрифугирования и капиллярного нанесения. Причем капиллярное нанесение обеспечивает почти 100 % использование исходного вещества. Гибридные пленки капиллярным методом получали как из заранее синтезированного твердофазным методом ГМ (например, $\text{CaF}_2\text{+Liq}$), так и проводя реакцию непосредственно в толщине нанесенной пленки при термической или СВЧ активации реакции. Такие пленочные люминесцентные ГМ могут найти широкое практическое применение в качестве компонентов маркировки [12].

Обобщая использованные методы синтеза ГМ, можно сказать, что различные методы позволяют получать объемные, порошковые или тонкопленочные ГМ с разными свойствами. С точки зрения интенсивности наилучшие показатели у твердофазного синтеза, капиллярного метода нанесения пленок и аэрогельного метода. Отчасти это связано с тем, что

эти методы обеспечивают наилучший перенос органического люминофора в целевое изделие. Так при расплавном методе происходит термическая деструкция более двух третей органического компонента, в золь-гель методе с длительной сушкой – осмоление. При соосаждении – вымывание люминофора. При вакуумном напылении распыление мимо подложки.

1. R.I. Avetisov et al., *Doklady Chemistry*. **454**. № 1. 6-8 (2014).
2. V. K. Brel et al., *Mendeleev Communications*. **34**. 329–331 (2024).
3. P.P. Banerjee et al., *Applied Optics*. **52**. № 22. HM1-HM3 (2013).
4. M. Carraro et al., *Materials*. **7**. 3956-3989 (2014).
5. B. Lebeau, *Chem. Soc. Rev.* **40**. 886–906 (2011).
6. Р. Т. Кузнецова и др., *Опт. и спектр.* **102**. №2. 241-251 (2007).
7. О. В. Petrova, et.al., *Opt. Mat.* **69**. 141–147 (2017).
8. R. Saifutyarov et.al., *Phys. Stat. Sol. (A) Appl. and Mat. Sc.* 1800647 (2019).
9. П. В. Стрекалов и др. *Цветные металлы*. № 10. 25–31 (2021).
10. К. И. Рунина и др. *Успехи в хим. и хим. тех.* **34**. № 4 (227). 80–82 (2020).
11. R. Avetisov, et al. *Molecules*. **27**. № 16. 5224 (2022).
12. M. Zyкова, et.al. *Applied Physics A*. **128**. № 3. 240 (2022).

ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОУПЛОТНЕНИЕ НАНОПОРИСТЫХ СТЕКОЛ

Ю.В. Спицына, А.С. Липатьев, С.И. Стопкин, Ю.В. Михайлов,

С.С. Федотов, И.С. Глебов, В.Н. Сигаев

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

E-mail: julyana2001@yandex.ru

В последнее время всё чаще проявляется интерес к пористым стеклам (ПС), которые находят практическое применение для создания матриц фотонных элементов, активных лазерных сред, оптической памяти [1]. Однако ПС относятся к термодинамически неустойчивым средам из-за их сильно развитой поверхности, большой свободной энергии, наличием не замкнутых $-Si-O-$ связей и, как следствие, данный материал обладает высокой склонностью адсорбции газов из окружающей среды, что приводит к изменению оптических свойств стекла с течением времени.

В данной работе продемонстрировано формирование однородного бездефектного и беспористого слоя на поверхности ПС посредством воздействия на поверхность излучением CO_2 -лазера. Для этого были рассмотрены высокоскоростные [2] и низкоскоростные [3] режимы лазерного термоуплотнения поверхности. После оптимизации режимов лазерного воздействия на поверхности был сформирован слой беспористого стекла, герметичность которого, была подтверждена путем нанесения на термоуплотненный участок капли дистиллированной воды, которая оставалась на поверхности без впитывания в пористую структуру образца (рис. 1). Показаны возможности как записи двулучепреломляющих вокселей фемтосекундными лазерными импульсами в объеме ПС через термоуплотненную поверхность, так и термоуплотнения ПС с предварительно записанными вокселями.

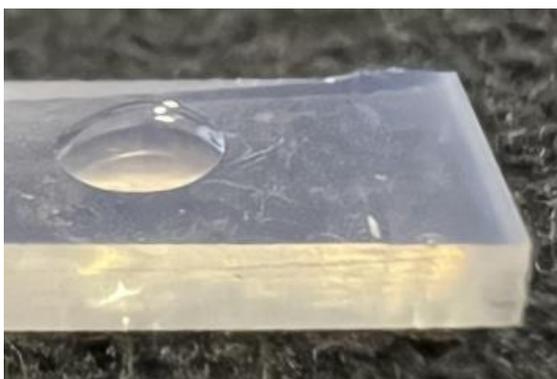


Рис. 1. Фотография поверхности термоуплотненного образца ПС, сделанная через несколько минут, после нанесения капли воды.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10231.

1. A. S. Lipatiev et al., *Applied optics*. **57**, 4, 978-982 (2018).
2. J. Hildebrand et al., *Physics Procedia*. **12**, 452-461 (2011).
3. K. Wissenbach, *Tailored light 2. Laser application technology*, Springer, 2011.

ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМЫ $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ – ТII

П.В. Пестерева, Е.Ю. Кабыкина, А.Е. Львов, Л.В. Жукова
*Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
E-mail: p.v.pestereva@urfu.ru*

В связи с тем, что ведутся активный поиск и разработка новой элементной базы, предназначенной для генерации, передачи и приема инфракрасного излучения, исследование новых материалов является актуальной задачей оптического материаловедения. В настоящее время наибольшую популярность приобрели материалы на основе галогенидов серебра и одновалентного таллия, поскольку они обладают высокой прозрачностью в широкой спектральной области от видимого до терагерцового диапазонов, пластичностью, негигроскопичностью, фотостойкостью и высокой устойчивостью к ионизирующему облучению. Научная лаборатория «Волоконных технологий и фотоники» занимается разработкой и исследованием новых оптических материалов на основе твердых растворов системы $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ – ТII.

Изготовление оптических материалов на основе твердых растворов системы $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ – ТII включает в себя процесс термозонной-кристаллизации синтеза (ТЗКС), за счет которого получают высокочистую шихту с частотой по катионным примесям не более 0,1 ppm, и непосредственно сам процесс выращивания монокристаллов и синтеза оптической керамики по методу Бриджмена с различными технологическими режимами. После чего, из синтезированных монокристаллов и оптической керамики изготавливают поликристаллические пластины с оптической поверхностью толщиной 350 ± 5 мкм по методу горячего прессования на ручном гидравлическом прессе для исследования функциональных свойств образцов [1].

При изготовлении пластин образцы показали себя высокопластичными, а монокристаллы визуально прозрачными в видимой области. По результатам исследования оптических свойств монокристаллов и оптической керамики на основе твердых растворов системы $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ – ТII было установлено, что монокристаллы пропускают в спектральном диапазоне от 0,48 до 41,7 мкм с прозрачностью до 70 % без учета френелевских потерь, а оптическая керамика – от 0,512 до 41,7 мкм с максимальной прозрачностью до 50 %. Так же материалы обладают устойчивостью к ультрафиолетовому и ионизирующему облучению. По методу Виккерса была определена микротвердость монокристаллов и оптической керамики, которая составляет от 1,77 до 4,78 в зависимости от состава при нагрузке 0,98 Н (100 грамм).

1. L. Zhukova, D. Shatunova, D. Salimgareev, A. Yuzhakova, A. Korsakov,
2. P. Pestereva, *Journal of Crystal Growth*. **627**, 127528 (2024).

ОКСОХЛОРИДНЫЕ СВИНЦОВО-ТЕЛЛУРИТНЫЕ СТЕКЛА,
ЛЕГИРОВАННЫЕ Tm^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ
В ИК-ФОТОНИКЕ

Д. Бутенков¹, А. Василенкова¹, А. Бакаева¹, К. Рунина¹, К. Veselský^{2,3},
P. Loiko², A. Braud², P. Camy², О. Петрова¹

¹ *Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева, Москва*

² *Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique (CIMAP),
UMR 6252 CEA-CNRS-ENSICAEN, Université de Caen Normandie*

³ *Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical
University in Prague*

E-mail: dabutenkov@gmail.com

Разработка материалов для инфракрасного диапазона спектра является актуальной задачей, поскольку он обладает рядом важных практических применений. Одним из перспективных материалов являются тяжелые стёкла на основе диоксида теллура, легированные редкоземельными ионами [1].

В представленном исследовании мы изучали спектрально-люминесцентные свойства стёкол $PbCl_2-TeO_2$, легированных ионами тулия (Tm^{3+}), гольмия (Ho^{3+}) и эрбия (Er^{3+}) в концентрациях 0,65 до 2 мол%. Введение хлорида свинца в состав теллуритных стёкол приводит к изменению их структуры, что видно в спектрах комбинационного рассеяния (появление полос, относящихся к связям Pb-Cl, уменьшение и перераспределение интенсивностей полос структурных единиц на основе связей Te-O). Структурные изменения сопровождаются снижением энергии фононов матрицы и уменьшением вероятности многофононной релаксации возбуждённых состояний ионов-активаторов.

Диапазон пропускания составляет от 0,4 до 7,5 мкм, при этом коэффициент поглощения OH-групп менее $1,5 \text{ см}^{-1}$. На спектрах поглощения стёкол присутствуют все характерные для ионов Tm^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} полосы поглощения. Стёкла демонстрируют интенсивную люминесценцию в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Впервые в диапазоне 2-3 мкм получена люминесценция в матрице на основе оксохлоридного свинцового стекла. Времена жизни возбуждённых состояний РЗИ в стёклах системы $PbCl_2-TeO_2$ больше, чем в похожих оксидных системах $ZnO-TeO_2$ и $La_2O_3-TeO_2$ [2]. Исследуемая система перспективна для применений в системах, работающих в инфракрасном диапазоне спектра.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы УМНИК (договор № 18370ГУ/2023).

1. V. I. Denker et al, Ap. Phys. В **124**, 1-8 (2018).
2. Y.X. Zhou et al, Optoel. Let., **8**, № 4, P. 273-276 (2012).

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА СТЕКОЛ В СИСТЕМЕ $\text{PbCl}_2\text{-PbO-V}_2\text{O}_3$, ЛЕГИРОВАННЫХ Nd^{3+}

А.В. Бакаева¹, Д.А. Бутенков¹, К.И. Рунина¹, А.В. Судьин², В.С. Царев³,
С.Н. Ушаков^{2,3}, М.А. Усламина², А.А. Пыненков², О.Б. Петрова¹,
И.Х. Аветисов¹

¹*Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева, Москва*

²*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

³*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
E-mail: bakaevanna@mail.ru*

Боратные стекла, содержащие соединения свинца, обладают комплексом уникальных свойств, таких как прочность, малое тепловое расширение, высокий показатель преломления и значительная прозрачность в широком диапазоне спектра. Оксогалогенидные стёкла очень перспективны для применений в качестве материалов-матриц для современных лазерных систем, в том числе волоконных [1].

В данной работе было синтезировано 3 серии стёкол с общей формулой $x\text{PbCl}_2\text{-(50-0,5x)PbO-(50-0,5x-y)V}_2\text{O}_3\text{-yNdF}_3$, где x варьировался от 0 до 40 мол.% с шагом 10 мол.%. Для первой серии y был равен 0 мол.%, для второй – 1 мол.%, а третья серия соответствовала общей формуле $30\text{PbCl}_2\text{-35PbO-(35-y)V}_2\text{O}_3\text{-yNdF}_3$, где $y=0,1, 0,3, 0,5, 1$ и 2 мол.%.

Введение PbCl_2 приводит к расширению окна прозрачности в ИК-области до 4,7 мкм (при 40 мол.% PbCl_2). По значениям показателя преломления и ходу оптической дисперсии стёкла относятся к сверхтяжелым флинтам. Исследуемые стёкла проявляют типичную для ионов Nd^{3+} люминесценцию. На контур полос люминесценции и время жизни возбужденных состояний влияет концентрация PbCl_2 в матрице стекла. Незначительный гипсохромный сдвиг спектральных линий сверхчувствительного перехода ${}^4\text{F}_{3/2}\text{-}{}^4\text{I}_{9/2}$ с 876 нм до 874 нм при увеличении содержания PbCl_2 от 0 до 40 мол.% указывает на смену окружения ионов Nd^{3+} с оксидного на более ионное (хлоридное) [2].

Была исследована структура стёкол. При введении PbCl_2 в состав стёкол происходит разрушение группировок PbO_4 и вхождение PbCl_2 в сетку стекла через мостиковые связи Pb-O-V . Происходит деполимеризация и ослабление стеклянной сетки с образованием изолированных ион-содержащих структурных единиц. Изменения структуры сетки стекла приводит к значительным изменениям физико-химических свойств и спектрально-люминесцентных характеристик.

1. D. Butenkov et al. *Ceramics* **6** (3), 1348 (2023).
2. Е.Ф. Кустов и др., *Электронные спектры соединений редкоземельных элементов*, М.: Наука, 1981.

КАЧЕСТВО КРИСТАЛЛОВ КОЛЬКВИРИИТА

Е.Б. Желева^{1,2}, В.В. Семашко^{1,2}, А.А. Шавельев¹, О.А. Морозов^{1,2},
В.М. Кяшкин³, А.А. Карабутов², Ю.П. Бродниковский²

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, Казань

³Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

E-mail: stillsennin@mail.ru

Кристаллы LiCaAlF_6 (LiCAF) с примесными ионами Ce^{3+} и Cr^{3+} активно используются в качестве лазерных сред ультрафиолетового и инфракрасного диапазонов, соответственно [1-3]. Контроль качества кристаллов на ранних стадиях после их синтеза является актуальной задачей.

В работе используются методы лазерной акустики для оперативной количественной оценки качества кристаллов LiCAF с помощью дефектоскопа УДЛ-2М. Данная методика позволяет осуществлять контроль на стадии шлифованных поверхностей, что не требует дорогостоящей прецизионной обработки кристаллов в отличие от традиционных поляризационных и интерферометрических методик.

Исследуемые образцы кристаллов LiCAF были выращены в Казанском федеральном университете [4]. Как известно [1,5], в синтезированных кристаллах данного химического состава наблюдается анизотропное рассеяние света на неоднородностях различной природы, которое успешно устраняется путем отжига образцов.

Исследования кристаллов LiCAF осуществлялись методами абсорбционной спектроскопии и лазерной акустики. Все измерения проводились вдоль оптической оси С. Изучены пространственные зависимости концентрации примесных ионов кристаллов и скоростей продольных и сдвиговых ультразвуковых волн (УЗВ) вдоль направления роста кристалла. Рассчитаны пространственные зависимости механических констант образцов и коэффициента затухания УЗВ. Показано, что коэффициент затухания ультразвука может служить параметром, позволяющим оперативно характеризовать качество синтезированных кристаллов LiCAF.

Исследование акустических характеристик кристаллов LiCAF было проведено в рамках государственного задания ФИЦ «Казанский научный центр РАН».

1. M.A. Dubinskii, et al, Journal of Modern Optics **40**, 1-5 (1993).
2. S.A. Payne, et al, Journal of quantum electronics **24**, 2243-2252 (1988).
3. V.V. Semashko, et al, Phys. Solid State **47**, 1507–1511 (2005).
4. J.J. De Yoreo, L.J. Atherton, D.H. Roberts, Journal of crystal growth **113**, 691-697 (1991).
5. A.A. Shavelev, et al, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering **11322**, 113221L (2019).

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ AgCl – AgBr – AgI

Д.Д. Салимгареев¹, А.А. Южакова¹, А.Е. Львов¹, П.В. Пестерева¹,
А.С. Корсаков¹, А.С. Шмыгалев¹, Л.В. Жукова¹

¹Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
E-mail: d.d.salimagreev@urfu.ru

Разработка инфракрасных и терагерцовых оптических материалов для широкоспектральных систем, медицины, ИК и ТГц техники является актуальной задачей. Перспективными материалами для данных применений являются разработанные авторским коллективом монокристаллы и оптическая керамика системы AgCl – AgBr – AgI [1], которые являются нетоксичными, негигроскопичными, обладают высокой фото- и радиационной устойчивостью. Высокая пластичность данных материалов позволяет на их основе методом горячего прессования изготавливать различные изделия (окна, линзы и т. д.), а методом экструзии – инфракрасные световоды.

В рамках системы AgCl – AgBr – AgI были уточнены фазовые диаграммы систем AgCl – AgI, AgCl – AgBr, AgBr – AgI и исследованы новые диаграммы AgCl – AgBr_{0,7}I_{0,3} и AgCl_{0,25}Br_{0,75} – AgI. Полученные результаты позволили выявить области гомо- и гетерогенности, составы которых пригодны для выращивания монокристаллов и синтеза оптической керамики соответственно. По изученным фазовым диаграммам подобраны оптимальные технологические режимы, синтезирована высокочистая шихта гидрохимическим методом и методом Бриджмена были выращены монокристаллы составов 3, 8 и 13 мол. % AgI в AgBr, 3 и 6 мол. % AgI в AgCl, 15, 28, 42 и 92 мол. % AgBr_{0,7}I_{0,3} в AgCl, 4, 8, 13, 16 и 20 % AgI в AgCl_{0,25}Br_{0,75}, а методом направленной кристаллизации синтезирована оптическая керамика составов 25 мол. % AgI в AgBr, 70 и 86 мол. % AgBr_{0,7}I_{0,3} в AgCl, 20 и 33 мол. % AgI в AgCl_{0,25}Br_{0,75}. Данные оптические материалы имеют диапазон пропускания в области от 0,4 до 60,0 мкм и более (30,0–5,0 ТГц) без окон поглощения с максимальной прозрачностью 75–85 % и в диапазоне от 300,0 до 1000,0 мкм и более (0,3–1,0 ТГц) с прозрачностью до 60–65 %. Показатели преломления в диапазоне длин волн от 3,0 до 14,0 мкм варьируются от 2,020 до 2,208. Подтверждена их высокая фото- и радиационная устойчивость.

Таким образом, разработанные новые оптические материалы являются перспективными для создания на их основе оптического оборудования, в том числе для медицины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Государственный контракт № FEUZ-2023-0021 (N687.42B.325/23)

1. L. Zhukova, D. Shatunova, D. Salimagreev, et al., Journal of Crystal Growth. **627**, 127528 (2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ЖЕЛЕЗА В НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОМ ZnS ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ

К.Г. Ким, К.А. Потапова, Е.Н. Воронина, С.С. Зыкова, Е.Н. Можевитина,
И.Х. Аветисов

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

E-mail: karina.kim.2002@inbox.ru

Сульфид цинка является широкополосным полупроводником группы $A^{II}B^{VI}$. Данный материал используется для изготовления электронно-лучевых трубок, эмиссионных дисплеев, сцинтилляторов [1], а также применяется в оптике для создания многослойных покрытий различного назначения [2]. Введение ионов Fe в структуру ZnS позволяет преобразовывать спектральный диапазон излучения ZnS:Fe в ИК область и дает возможность создавать широкие полосы поглощения и эмиссии [3].

Исходный кристаллический ZnS, предоставленный ИХВВ им. Г. Г. Девярых РАН, был получен CVD-методом и имел кубическую структуру сфалерита ($F43m$). ZnS предварительно измельчали в агатовой ступке под атмосферой аргона. Химическая чистота препарата ZnS была не хуже, чем 99,999 мас.%, без учета газообразующих примесей. Препарат сульфида железа (FeS) заранее был синтезирован по методике, описанной в [4]. Исследования растворимости Fe в ZnS проводили в условиях бивариантного равновесия. Отжиги проводили в кварцевых ампулах, предварительно вакуумированных до давления остаточных газов не хуже 10^{-3} Па и герметично запаянных. Синтез нестехиометрических препаратов проводили при температуре 1323 К, после чего ампулы сбрасывали в холодную воду. Анализ растворенного железа проводили методом МС-ИСП. Концентрации растворенного железа в препаратах сульфида цинка приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения растворимости Fe в ZnS

T_{ZnS}, K	T_{FeS}, K	$X_{Fe}^{раств}$ мас. %
1323	1005	$2,4 \times 10^{-3}$
1323	1256	$2,6 \times 10^{-3}$

1. J. P. Borah, J. Barman, K. C. Sarma. Chalcogenide Lett. **5**, 201-208, №. 9 (2008).

2. С. К. Ших. Разработка технологии создания защитного покрытия на основе сульфида цинка для голографических изображений (2012).

3. К.Е. Федорович, К.И. Сергеевич. Альтернативная энергетика и экология, **10-11**, 150-166 (2015).

4. К.А. Потапова, З.А. Баландина, М.П. Зыкова, и др., Успехи в химии и химической технологии. **7** 256 (2022).

НОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ $TlBr_{0,46}I_{0,54} - AgCl$

В.М. Кондрашин

Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

E-mail: l.v.zhukova@urfu.ru

Известны поликристаллические ИК-световоды, изготовленные из монокристаллов КРС-5 (твёрдые растворы галогенидов таллия $TlBr_{0,46}I_{0,54}$), прозрачны в диапазоне от 0,5 до 45 мкм [1]. Однако они не получили широкого распространения из-за быстрой деградации, вызванной рекристаллизацией зёрен. Поэтому поиск новых материалов прозрачных в широком спектральном диапазоне и устойчивых под действием излучений и неразрушающихся со временем является актуальной задачей на сегодняшний день.

Коллективом научной лаборатории «Волоконных технологий и фотоники» УрФУ в продолжении исследований материалов на основе галогенидов серебра и таллия [2], построена и исследована фазовая диаграмма плавкости твердых растворов системы $TlBr_{0,46}I_{0,54} - AgCl$, представленная на рисунке 1.

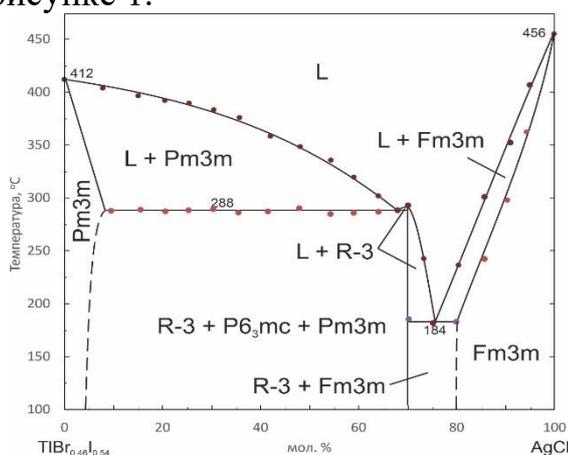


Рис. 1. – Фазовая диаграмма системы $TlBr_{0,46}I_{0,54} - AgCl$.

Выращены монокристаллы, составов 90, 95, 98 мол. % AgCl в $TlBr_{0,46}I_{0,54}$, синтезирована оптическая керамика, составов 6, 18 и 98 мол. % AgCl в $TlBr_{0,46}I_{0,54}$. Выращены новые монокристаллы и керамика системы $TlBr_{0,46}I_{0,54} - AgCl$ прозрачные до 80% без окон поглощения, в спектральном диапазоне от 4,0 до 55,0 мкм.

1. Т. Кацуяма, Х. Мацумура, Инфракрасные волоконные световоды / Т. Кацуяма, Х. Мацумура ; пер. с англ. В. Г. Плотниченко. – Москва : Мир, 1992. – 272 с.

2. D. Salimgareev, A. Yuzhakova, A. Lvov et al. Optical materials (Amsterdam) 1 September 2022 Materials Science, Physics. **131**, 1 (2022).

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СИСТЕМЕ
ФТОРИДА СВИНЦА С 8-ОКСИХИНОЛЯТОМ ЦИНКА,
ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ СООСАЖДЕНИЯ

П.В. Стрекалов, Е.В. Мягкова, К.И. Рунина, О.Б. Петрова

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

E-mail: strekalov_pavel@mail.ru

Гибридные материалы (ГМ) обладают значительными перспективами, поскольку способны сочетать в себе различные свойства органических и неорганических компонентов для создания материалов с уникальными функциональными свойствами. В наших предыдущих работах мы успешно синтезировали гибридные материалы на основе PbF_2 -содержащих матриц методом соосаждения [1] с использованием 8-оксихинолята лития (Liq). Эти материалы продемонстрировали высокую эффективность люминесценции в сочетании с коротковолновым спектром, что указывает на их потенциал для будущих применений.

При приготовлении ГМ на основе фторида свинца на первой стадии синтеза смешивали исходный водный раствор нитрата свинца и раствор бис-(8-оксихинолята) цинка Znq_2 в этаноле. Концентрация раствора нитрата свинца $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ составляла $C_{m1} = 1,43$ М и $C_{m2} = 0,8$ М. На второй стадии синтеза проводили осаждение конечного продукта, где в качестве фторирующего агента использовали водный раствор фторида аммония. В результате соосаждения были получены порошки, кристаллическая структура которых соответствовала α - PbF_2 и небольшим включениям (не более 2 об. %) β - PbF_2 , независимо от условий синтеза.

Сравнение нормированных спектров фотолюминесценции (ФЛ) ГМ и исходного порошкового препарата Znq_2 показало, что широкая полоса (400-700 нм) люминесценции заметно смещена в сторону более коротких длин волн ($\lambda_{\text{max}}=485$ -490 нм) по сравнению с исходным Znq_2 ($\lambda_{\text{max}}=505$ нм), а при обратном соосаждении появляется еще более коротковолновая компонента ($\lambda_{\text{max}}=420$ -440 нм). Оптические центры с $\lambda_{\text{max}}=485$ -490 нм могут быть связаны как с захватом молекул Znq_2 в различных полиморфных модификациях, так и с обменной реакцией с образованием Pbq_2 или $[\text{PbqF}]_2$, имеющих максимум на 500 нм. А для коротковолновой компоненты с $\lambda_{\text{max}}=420$ -440 нм можно предположить введение в бензольное кольцо оксихинолина электроноакцепторных групп, таких как фтор, что может приводить к синему сдвигу длины волны люминесценции получаемых гибридных материалов [2].

1. П.В. Стрекалов, М.Н. Маякова, К.И. Рунина, и др. Цветные металлы, **10**, 25-31 (2021).

2. Y.-W. Shi, M.-M. Shi, J.-C. Huang, et al., Chemical Communications, **18**, 1941-1943, (2006).

ВЛИЯНИЕ НАНО- И ФЕМТОСЕКУНДНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ CsPbI_3 В БОРОГЕРМАНАТНОМ СТЕКЛЕ

А.Н. Бабкина, А.Л. Лосин, Р.Д. Харисова, К.С. Зырянова, В.А. Асеев,
А.Д. Долгополов, М.М. Сергеев
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
E-mail: babkina.anastasya@bk.ru

В работе показана лазерно-индуцированная нуклеация нанокристаллов перовскитов состава CsPbI_3 в матрице борогерманатного стекла nano- и фемтосекундным лазерным излучением. В качестве объекта исследования было взято борогерманатное стекло состава 6,67 ZnO – 5,81 Na₂O – 31,3 V₂O₃ – 50,53 GeO₂ мол. % с добавками, необходимыми для выделения нанокристаллической фазы: CsCO₃, PbO и KI. Источником фемтосекундного излучения был лазерный источник ANTAUS (AVESTA, $\lambda = 1030$ нм, длительность импульса 224 фс, частота следования импульсов 50 кГц, энергия импульса 2,57 мкДж, количество импульсов в облучаемой области от 500 до 500 000). Источником наносекундного излучения был Nd:YAG-лазер LQ 529B (532,8 нм, длительность импульса 10 нс, 10 Гц, 190 мДж) (Solar Laser Systems). Исходное стекло не обладало люминесценцией, но после лазерного облучения в областях воздействия была зарегистрирована люминесценция в красной области. На рис. 1 представлены спектры люминесценции, полученные после лазерного воздействия фемтосекундной (а) и наносекундной (б) длительности. В отличие от представленных ранее работ [1,2], где для получения люминесценции нанокристаллов перовскитов, выделенных в ходе лазерного воздействия, была необходима дополнительная термическая обработка, в нашем случае она не требовалась.

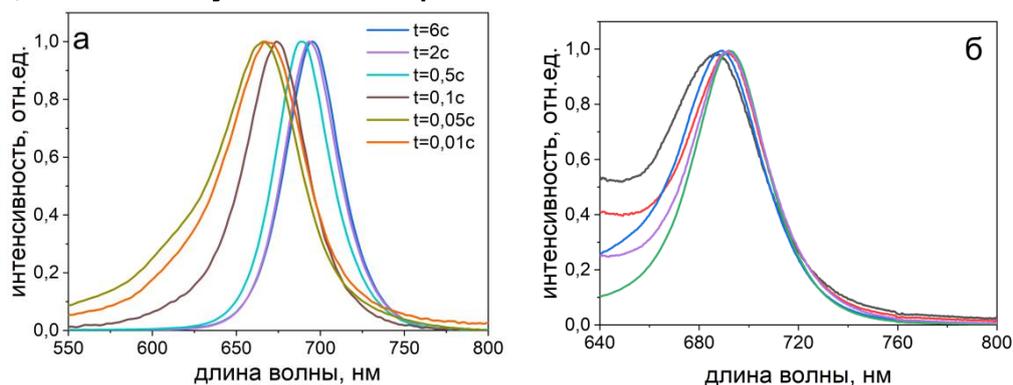


Рис. 1. Спектры люминесценции нанокристаллов CsPbI_3 в борогерманатном стекле, полученных после воздействия разной длительности фемтосекундного лазера с $E_p=2,57$ мкДж (а), после воздействия наносекундного лазера (б).

Синтез исследуемых материалов был выполнен при поддержке РФФ (проект № 24-72-10103).

1. K. Sun, D. Tan, X. Fang, и др., Science. **375**, 310 (2022).
2. Y. Teng, J. Zhou, G. Lin, и др., Int. J. Optomech. **6**(2), 179 (2012).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЗОТА И ВИСМУТА НА СВОЙСТВА РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА GaMnAs

Д.А. Здоровейшев, Ю.А. Данилов, Е. И. Малышев

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

E-mail: danielzdoroveishev@yandex.ru

В настоящее время ведутся поиски способов модификации свойств арсенида галлия, которые смогли бы расширить круг его применений в области наноэлектроники. Одним из таких способов может выступать легирование изовалентными мышьяку примесями, например, висмутом или азотом. Введение висмута или азота в GaAs приводит к существенному изменению его свойств. Так, сообщается об уменьшении ширины запрещенной зоны при введении небольших концентраций висмута [1]. Аналогичное явление наблюдается и при введении азота, когда получают так называемые «разбавленные» нитриды [2]. Также известно о влиянии этих изовалентных примесей на свойства разбавленного магнитного полупроводника GaMnAs – одного из перспективных материалов полупроводниковой спинтроники [3-4].

В данной работе исследуемые структуры получались с использованием двух методик: импульсным лазерным нанесением (ИЛН) в вакууме формировались структуры GaMnAs, а также GaMnAs:Bi. Образцы GaMnAs:N были получены комбинированным методом, представляющим собой ИЛН с последующей ионной имплантацией азота с энергией ионов 10 кэВ и варьируемыми дозами облучения. Для устранения дефектов и электрической активации марганца структуры подвергались импульсному лазерному отжигу (ИЛО) импульсом эксимерного KrF лазера с варьируемой плотностью энергии в импульсе. На полученных структурах исследовались магнитополевые зависимости эффекта Холла и магнетосопротивления (МС) в температурном диапазоне 7 – 300 К.

В работе показано, что соединения GaMnAs:Bi и GaMnAs:N являются ферромагнитными, причем для данных структур температура Кюри несколько понижается по сравнению с исходными слоями GaMnAs. Введение висмута приводит к изменению магнитной анизотропии в GaMnAs, увеличивается коэрцитивное поле и МС, что согласуется с данными [3]. Для слоев GaMnAs:N наблюдается увеличение коэрцитивного поля, что может быть связано с присутствием остаточных дефектов после ионной имплантации, а также с избыточной концентрацией азота, аналогично описанному в [4].

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSWR-2023-0037).

1. A.R. Mohmad et al. Phys. Status Solidi B **251**(6), 1276(2014).
2. L. Bellaiche, S.-H. Wei, A. Zunger, Appl. Phys. Lett. **70**(26), 3558 (1997)
3. T. Andrearczyk et al., Materials. **13**(23), 5507(2020).
4. T. Manago, H. Akinaga, Jap. J. Appl. Phys. **47**(8), 6297 (2008).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ НА ОСНОВЕ SiFe

А.С. Шкапина, Р.Н. Крюков, Ю.А. Дудин, М.В. Дорохин, С.Ю. Зубков,
А.В. Здравейцев

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

E-mail: alenashkapina@yandex.ru

Развивающимся направлением современной науки является разработка и исследование термоэлектрических преобразователей тепловой энергии. В настоящее время ведутся поиски материалов, использование которых позволило бы повысить эффективность их работы. КПД может быть увеличен, например, за счет многофазности системы. Дополнительно имеются работы, показывающие влияние нестехиометричности на рабочие характеристики систем [1]. Для решения этих задачи подходит использование силицидов переходных металлов.

Исследуемые образцы силицидов железа были получены методом ионной имплантации на комплексе РАДУГА-3М. Ускоряющее напряжение составляло 80 кВ. Конечная доза ионов достигала $5 \cdot 10^{16}$ см⁻². Далее серия образцов подвергалась быстрому термическому отжигу (БТО) при температуре 1000 °С длительностью от 15 с до 900 с. Для исследования химического состава и изучения эффективности образования связей Si-Fe использовался метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Дополнительно для определения теплопроводности структур, влияющей на добротность полученных систем, использовался 3ω -метод.

Используя профилирование структур по глубине непосредственно в спектрометре, зарегистрирована диффузия железа вглубь образца. С увеличением длительности отжига количество атомов Fe, входящих в химическую связь Fe-Si уменьшается, что, вероятно, связано с рекристаллизацией кремниевой матрицы. Данные результаты позволяют оценить длительность отжига, оптимальную для формирования структур с наибольшим числом связей Si-Fe, которое составляет 60 с. По мере увеличения длительности БТО, теплопроводность снижается, что может быть обусловлено образованием металл-силицидных комплексов, которые в свою очередь блокируют фононные моды, передающие тепло [2]. Данный факт может быть использован для увеличения добротности структур, обратно пропорциональной теплопроводности.

Работа была выполнена при поддержке министерства науки и высшего образования РФ (госзадание FSWR-2023-0052).

1. Yu Jian et al., *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 2139 (2020).

2. D.M. Rowe, *Thermoelectrics Handbook. Macro to Nano*. – NY: CRC Press, 2006.

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА Nd-СОДЕРЖАЩИХ ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКОЛ

В.В. Ковгар^{1,2}, М.З. Зиятдинова³, Л.С. Плехова²

¹*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск*

²*Белорусский государственный университет, Минск*

³*Российский химико-технологический университет*

им. Д.И. Менделеева, Москва

E-mail: v.kouhar@ifanbel.bas-net.by

Стекла, активированные редкоземельными ионами, широко используются в лазерной технике, интегральной и волоконной оптике [1]. Однако, одним из источников тушения люминесценции таких ионов в оксидных матрицах являются группы гидроксила (ОН⁻). В работе [2] было показано, что для уменьшения концентрации указанных групп во всем объеме образца применительно к иттрий-алюмооборатным стеклам достаточно барботирования их расплава сухим кислородом. Такая обработка не оказывает влияния на эффективность внутрицентрального тушения люминесценции, так как не приводит к изменению структуры лиганда. Кроме того, хантитоподобные стекла характеризуются рекордно большим минимально возможным расстоянием между Ln–Ln $\approx 0,67$ нм [3], следовательно, и пониженной эффективностью кросс-релаксации. Цель работы – разработка новых Nd-содержащих оксифторидных иттрий-алюмооборатных стекол с пониженным содержанием ОН⁻-групп.

Показано, что фторирование иттрий-алюмооборатных стекол с составом вблизи стехиометрии хантита, легированных неодимом, приводит к увеличению коэффициента удельного поглощения ионов Nd³⁺. Для стекол с концентрацией оксида неодима (III) 0,1 мол. % (по синтезу) в спектральной области от 780 до 950 нм наблюдается, по сравнению с нефторированными образцами, увеличение интегральной интенсивности люминесценции на 25–30 % при всех длинах волн возбуждения, а при концентрации 5,0 мол. % – ее уменьшение на 10–20 %. Указанное усиление тушения люминесценции ионов Nd³⁺ свидетельствует в пользу уменьшения минимального расстояния между ионами активатора в синтезированном стекле. Интересно, что при низкой концентрации неодима была зарегистрирована широкая полоса люминесценции с максимумом ~ 450 нм, которая проявляется, как правило, только в кристаллах.

Подобраны режим и условия дополнительной термообработки Nd-содержащих оксифторидных иттрий-алюмооборатных стекол, что позволяет в 3 раза уменьшить поглощение в области основных колебаний ОН⁻-групп, а также повысить интенсивность люминесценции в полосах $^2H_{9/2} + ^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ и $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ ионов Nd³⁺.

1. C.N. Santos et al., J. Appl. Phys., **106**, 023512-1–6 (2009).

2. G.E. Malashkevich et al., Opt. Mat., **76**, 253–259 (2018).

3. G.E. Malashkevich et al., Mat. Chem. and Phys., **137**, 48–54 (2012).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА МИКРОТВЕРДОСТИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ AgCl-KPC-5

Е. Ю. Кабыкина, П. В. Пестерева, Л. В. Жукова

Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

E-mail: e.iu.kabykina@urfu.ru

Определение микротвердости является одним из основных шагов в измерении механических свойств новых материалов. В данной работе представлены результаты исследования инфракрасных материалов на основе галогенидов серебра и таллия системы $\text{AgCl-TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$. Оптические материалы в основе которых содержатся галогениды серебра и таллия обладают широким диапазоном пропускания, пластичностью, негигроскопичностью, а также высокой фото- и радиационной стойкостью [1]. На их основе получают линзы, окна, световоды, работающие в инфракрасном диапазоне.

Для исследования микротвердости монокристаллов и оптической керамики системы $\text{AgCl-TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ был использован метод Виккерса [2]. Данный метод измерения простой и универсальный. Установка ПМТ-3М, на которой проводилось исследование, была откалибрована определением числа твердости кристалла поваренной соли (NaCl) в соответствии с справочными данными. Исследование проводилось на образцах монокристаллов состава 80, 90, 95, 98 мас. % AgCl в $\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ и оптической керамики 3, 6, 9 мас. % AgCl в $\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$. Измерение микротвердости происходило путем вдавливания алмазной пирамиды с углом при вершине 136° в исследуемый материал под нагрузкой 0.98 Н с выдержкой 15 с. Глубина вдавливания индентора при определении микротвердости исследуемых монокристаллов и керамики составляет несколько микрометров при нагрузке в 100 г, поэтому измерение твердости материалов производится в гс/мкм^2 .

В результате измерения микротвердости была выявлена зависимость значений числа твердости от состава. С увеличением содержания AgCl число твердости уменьшается от 53,2 до 13,2 для составов 3 и 98 мас. % AgCl в $\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ соответственно. Коэффициент вариации (погрешность измерения) для монокристаллов составляет до 5 %, а для оптической керамики до 10 %.

1. L. Zhukova, D. Shatunova, D. Salimgareev, et al., *Journal of Crystal Growth*. **627**, 127528 (2024).

2. А. А. Теплоухов, *Измерение микротвердости поверхностных слоев материалов: метод. указания*, Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОДНОСЛОЙНЫХ ВОЛОКОН

П.В. Пестерева, Д.Д. Салимгареев, С.Е. Барыкина, Л.В. Жукова

Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

E-mail: l.v.zhukova@urfu.ru

Разработка и изготовление инфракрасных волокон, а также исследование их оптических свойств, является актуальной задачей современной волоконной оптики и фотоники за счет широкого диапазона пропускания без окон поглощения. В научной лаборатории «Волоконных технологий и фотоники» на протяжении долгих лет занимаются разработкой оптических материалов на основе галогенидов серебра и одновалентного таллия, обладающих высокими функциональными свойствами, предназначенных для ИК-спектроскопии, ИК-пирометрии, лазерной и медицинской техники, тепловидения, а также волоконной оптики и фотоники. В настоящее время в лаборатории разработаны алгоритмы моделирования оптических волокон и процесса экструзии однослойных световодов на основе систем $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ и $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlCl}_{0,74}\text{Br}_{0,26}$. Для решения поставленной цели было использовано моделирование по методу конечных элементов в ПО COMSOL Multiphysics с использованием встроенных интерфейсов. Моделирование волокон и процесса экструзии позволяет подобрать оптимальные режимы изготовления оптических волокон, а также рассчитать теплофизические и механические параметры, сопутствующие процессу экструзии [1].

Волокна на основе $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ и $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlCl}_{0,74}\text{Br}_{0,26}$ показали высокие уровни энергий (до $3,45 \text{ кВт/м}^2$) при низких значениях оптических потерь (до $0,09 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/м}$ для моды LP01). По результатам моделирования процесса экструзии и полученным технологическим режимам были изготовлены поликристаллические световоды состава 3 и 93 мол. % $\text{TlCl}_{0,74}\text{Br}_{0,26}$ в $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$, 3, 6 и 9 мол. % $\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ в $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$. Исследование оптических свойств волокон показало, что спектральное пропускание образцов зависело от состава. Волокна на основе $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlCl}_{0,74}\text{Br}_{0,26}$ прозрачны от 3,0–4,0 до 15,0–25,0 мкм, а волокна системы $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ – в диапазоне от 3,5 до 28,0 мкм. В волокнах состава 93 мол. % $\text{TlCl}_{0,74}\text{Br}_{0,26}$ в $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ наблюдалась рекристаллизация зерен в течении нескольких часов после изготовления, что привело к их разрушению. Минимальные оптические потери составили 0,2 дБ/м (при длинах волн 11,2 – 14,7 мкм) для волокон на основе твердых растворов $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlCl}_{0,74}\text{Br}_{0,26}$ и 0,8 дБ/м (при длинах волн 10,0 – 14,0 мкм) в случае волокон системы $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$.

1. A. Yuzhakova, D. Salimgareev, A. Lvov, et al., *Opical Materials*. **131**, 112687 (2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ КРИСТАЛЛИТОВ
И МИКРОНАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ
СИСТЕМ $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ и $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlCl}_{0,74}\text{Br}_{0,26}$

Д.Д. Салимгареев, А.А. Южакова, А.Е. Львов, П.В. Пестерева,
Ф.М. Кучеренко, Е.Ю. Кабыкина, Л.В. Жукова
*Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
E-mail: d.d.salimgareev@urfu.ru*

Фазовые диаграммы систем $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ и $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} - \text{TlCl}_{0,74}\text{Br}_{0,26}$ характеризуются неограниченной растворимостью в жидком состоянии и ограниченной растворимостью в твердом состоянии. В каждой из диаграмм наблюдается наличие двух областей гомогенности – граничных твердых растворов на основе $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$, $\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ или $\text{TlCl}_{0,74}\text{Br}_{0,26}$, а также гетерогенные области из двух фаз на основе граничных твердых растворов и ромбических фаз ($\text{Fm}\bar{3}\text{m}+\text{R}-3$ и $\text{Pm}\bar{3}\text{m}+\text{R}-3$). В этих областях возможно получать различную поликристаллическую оптику. Поскольку эти материалы прозрачны от видимой до дальней инфракрасной области размеров кристаллитов может существенно сказываться на пропускании. В связи с этим было необходимо исследовать зависимость размеров кристаллитов и микронапряжения от состава. По данным рентгенофазового анализа были рассчитаны значения размеров кристаллитов и микронапряжения в кубических фазах. Для этого использовались уравнение Шеррера и модели Уильямсона-Холла [1] типа UDM [2], USDM [3], UDEDM [4]. РФА были получены на установке Rigaku MiniFlex 600, режимы: анод – Cu; излучение $\text{CuK}\alpha$ с длиной волны 1,541862 Å; диапазон съемки от 3° до 90°; шаг 0,02°; скорость сканирования 10 °/мин. Рентгенограммы обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения «Rigaku PDXL XRD analysis software» с погрешностью измерения параметров кристаллической решетки $\pm 0,002$ Å. Согласно проведенным расчетам размер кристаллитов в кубических фазах для обеих систем уменьшается при приближении к точке эвтектики только по модели Шеррера (от 80 до 17 нм), по другим моделям какой-либо четкой зависимости не наблюдается.

1. V. Mote, Y. Purushotham, B. Dole, J. of Theor. and Appl. Phys. **6**, 1 (2012).
2. V. Biju, N. Sugathan, V. Vrinda, et al., J. Mater. Sc. **1**, 43 (2008).
3. Z.A. Khorsand, W.H. Abdul Majid, M.E. Abrishami, et al., Solid State Sci. **13** (2011).
4. H. Irfan, K.M. Racik, S. Anand, J. Asian Ceram. Soc. **6**, 1 (2018).

ЦИНК-ТЕЛЛУРИТНЫЕ СТЕКЛА ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ В ИК-ДИАПАЗОНЕ

А.Р. Шарафеев¹, В.В. Дорофеев^{1,2}, С.Е. Моторин^{1,2}, А.К. Ким²,
С.В. Муравьев², М.Ю. Коптев², В.В. Колташев³

¹*Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятовых РАН,
Нижний Новгород*

²*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний
Новгород*

³*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
E-mail: sharafeev@ihps-nnov.ru*

Стекла, применяемые для изготовления оптических волокон, должны быть высокопрозрачны в целевом диапазоне длин волн, устойчивы к кристаллизации, обладать возможностью модификации показателя преломления и активации редкоземельными ионами в необходимой концентрации. Таковыми для ближнего и среднего ИК-диапазонов являются некоторые составы цинк-теллуридных стёкол.

Синтез серий составов стёкол на основе $\text{TeO}_2\text{-ZnO}$ с добавлением модифицирующих компонентов – La_2O_3 , Na_2O , Bi_2O_3 проводили в потоке очищенного кислорода в герметичном реакторе из кварцевого стекла. Исследовали теплофизические свойства, спектры пропускания, спектральные зависимости показателя преломления.

Наибольшей устойчивостью к кристаллизации обладает ряд стёкол системы $\text{TeO}_2\text{-ZnO-La}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$. По данным ДСК в лучших составах отсутствовали тепловые эффекты кристаллизации и плавления кристаллов даже при низких скоростях нагрева 5 и 2,5 К/мин. Температура стеклования ~ 300 °С, а следовательно, и вязкость стёкол, практически не зависели от концентрации ZnO в области 10-20 мол. %.

Уровень пропускания стёкол в виде тонких пластинок превышает 20 % в диапазоне 0,4 – 6,2 мкм. На спектрах не обезвоженных образцов присутствуют полосы поглощения гидроксильных групп с максимумами на 2,3; 3,3 и 4,5 мкм. С использованием оригинальной методики обезвоживания получены образцы с рекордно низким поглощением гидроксильных групп $0,001\text{--}0,002$ см^{-1} в полосе $\sim 3,3$ мкм.

Показано, что эффективная модификация показателя преломления возможна за счёт изменения концентрации оксида цинка.

Установлена возможность легирования разработанных матричных составов оксидами РЗЭ в концентрации до нескольких мол. %. Были успешно изготовлены волоконные световоды со ступенчатым профилем показателя преломления, в том числе активированные ионами эрбия, с оптическими потерями не более 0,5 дБ/м в диапазоне 1,7–2,7 мкм.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках реализации Программы НЦМУ «Центр фотоники» при финансовой поддержке Минобрнауки, соглашение № 075-15-2022-316.

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СПЕКТРАЛЬНО-
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИК
 $ZrO_2-Sc_2O_3-Yb_2O_3$

Е.М. Бузаева¹, Д.А. Агарков², М.А. Борик³, Г.М. Кораблева²,
А.В. Кулебякин³, И.Е. Курицина², В.М. Кяшкин¹, Е.Е. Ломонова³,
Ф.О. Милович⁴, В.А. Мызина³, П.А. Рябочкина¹, Н.Ю. Табачкова^{3,4}

¹Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

²Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

⁴НИТУ МИСИС, Москва

E-mail: katyabuzaeva@yandex.ru

Керамические материалы на основе стабилизированного диоксида циркония обладают высокой кислородно-ионной проводимостью при повышенных температурах, что позволяет использовать их в качестве твердых электролитов. Отдельного внимания заслуживают керамические твердые электролиты на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами скандия. Одним из эффективных оксидов совместного легирования, стабилизирующих высокопроводящую кубическую фазу в системе $ZrO_2-Sc_2O_3$, является Yb_2O_3 [1].

На структуру, стабильность физико-механических и электропроводящих свойств керамик влияют метод синтеза и условия процесса ее изготовления, которые главным образом определяют микроструктуру материала.

В данной работе реализован метод изготовления образцов керамик $(ZrO_2)_{0.90}(Sc_2O_3)_{0.09}(Yb_2O_3)_{0.01}$ из порошков, полученных при размоле плавленных твердых растворов аналогичного состава, полученных направленной кристаллизацией расплава в холодном контейнере.

Результаты рентгенофазового анализа исследуемых керамических образцов свидетельствуют о том, что они являются однофазными и обладают кубической структурой типа флюорита.

Спектрально-люминесцентные свойства полученных керамик были изучены методом оптической спектроскопии. Сравнительный анализ спектров люминесценции ионов Eu^{3+} в твердых растворах керамических и монокристаллических образцов одинакового состава не выявил существенных различий, что свидетельствует об идентичности их локальной структуры.

Получены изображения микроструктуры поверхности керамик. Анализ показал, что размер керамических зерен находится в диапазоне от ~ 1 до 10 мкм. Большинство зерен ~ 50%, имеют размеры до ~ 5-6 мкм.

Проведены измерения ионной проводимости керамик. Получено, что во всем диапазоне температур ионная проводимость керамик ниже, чем у монокристаллов аналогичного состава, что, скорее всего, обусловлено наличием пор и границ зерен в образцах керамики.

1. V. Shukla, K. Balani, A. Subramaniam, et al., J Phys Chem J. Phys. Chem. **123**, 21982–21992 (2019).

ПРОЦЕССЫ БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ
В КРИСТАЛЛАХ $ZrO_2-Eu_2O_3$

М.А. Борик¹, С.А. Букарев², А.В. Кулебякин¹, Н.А. Ларина²,
Е.Е. Ломонова¹, Ф.О. Милович^{3,4}, В.А. Мызина¹, В. Панкратов⁴, А.А. Реу¹,
П.А. Рябочкина², Н.Ю. Табачкова³, Т.В. Волкова², А.М. Зюзин²

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

²Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

³Университет науки и технологий МИСИС, Москва

⁴Московский политехнический университет, Москва

⁴Институт физики твердого тела Латвийского университета,
Рига, Латвия

E-mail: bukarevsa@yandex.ru

Кристаллы, легированные ионами европия, характеризуются полосами люминесценции в видимой области и часто используются в качестве эффективных кристаллических люминофоров. Люминесцентные свойства таких люминофоров могут быть обусловлены оптическими переходами между уровнями энергии ионов Eu^{2+} и Eu^{3+} .

В настоящей работе представлены результаты фазового состава и спектрально-люминесцентных характеристик концентрационного ряда кристаллов ZrO_2 -х мол.% Eu_2O_3 (где $x = 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 27$).

Выявлено, что кристаллы ZrO_2 -х мол.% Eu_2O_3 ($x=4,6$) характеризуются тетрагональной структурой. Для кристаллов ZrO_2 -8 мол.% Eu_2O_3 характерна смесь кубической и тетрагональной фаз. Кристаллы ZrO_2 -х мол.% Eu_2O_3 ($x=10,12,15$) имеют кубическую структуру, а кристаллы ZrO_2 -27 мол.% Eu_2O_3 являются двухфазными, содержащими кубическую модификацию и фазу пирохлора.

Методами оптической и ЭПР – спектроскопии в кристаллах концентрационного ряда $ZrO_2-Eu_2O_3$ после роста выявлено наличие центров окраски и ионов Eu^{2+} .

Показано, что в кристаллах ZrO_2 -х мол.% Eu_2O_3 ($x = 4-15$) доминирующими оптическими центрами ионов Eu^{3+} являются восьмикоординированные по кислороду оптические центры, имеющие вакансии во второй и дальних координационных сферах. В кристаллах ZrO_2 -20 мол.% Eu_2O_3 и ZrO_2 -27 мол.% Eu_2O_3 выявлены шестикоординированные по кислороду оптические центры ионов Eu^{3+} .

New functional materials

MULTIFUNCTIONAL PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASSES
FOR PHOTONICS: HISTORY, PROPERTIES, TECHNOLOGIES
AND APPLICATIONS (A REVIEW)

N.V. Nikonorov

National Research University ITMO, St. Petersburg

E-mail: *nikonorov@oi.ifmo.ru*

Photo-thermo-refractive (PTR) glasses are a new class of multifunctional photosensitive materials designed to fabricate a wide range of photonic elements and devices: volume phase holograms (Bragg gratings), gradient-index elements, waveguide and hollow microfluidic structures, phosphors, sensors, lasers with distributed feedback etc. [1, 2].

The prototype of PTR glasses was polychrome glass (PCG) developed by Stookey S. at the American company Corning in 1978 [3]. In Russia, these glasses appeared later (in the 80s). The developer of these glasses was V.Tsekhomsky's group at S.I. Vavilov State Optical Institute (USSR). These glasses had the same functionality as PCG and received a similar name "multichrome glasses" (MCG) [4]. The main feature of PCG/MCG is the selective absorption of light in the visible region of the spectrum. These glasses acquire a wide range of colors as a result of the following photochemical and diffusion processes (photo-thermo-induced crystallization). Under the influence of UV radiation and subsequent heat treatment, crystallization centers are formed - metallic silver nanoparticles, and NaF-AgBr nanocrystals grow on these centers. Under certain conditions of photo-thermal-induced growth, these nanocrystals acquire a complex shape in the form of elongated cone-shaped structures similar to "carrots". Additional multistage UV irradiation and heat treatment lead to photolytic deposition of silver (decoration) on elongated structures. Metallic silver deposited on the surface of a nanocrystal in the form of a shell also acquires a cone shape, which leads to a shift of absorption bands in the visible region of the spectrum. Thus, the main condition for polychrome/multichrome coloring is the cone shape of metallic silver nanoparticles. Thus, a variety of colors are formed in the glass volume, including a full range of colors: blue, green, yellow, orange, red and their derivatives, which allows us to record a color image in the glass. Figure 1 shows a photograph of a multicolored image recorded in the volume of MCG synthesized at ITMO University [1]. It should be noted, that despite the attractiveness of recording a color image in a volume of glass with the use only UV radiation and heat treatment, PCG and MCG have not yet found any widespread applications.

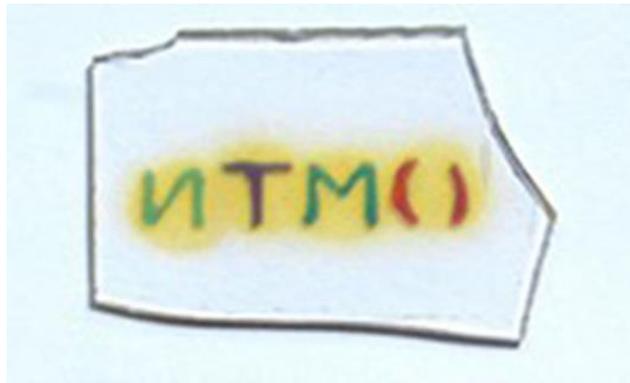


Fig.1. Multicolor image made with a UV laser (325 nm) followed by heat treatment in the glass volume [1].

In the late 80s and early 90s, Nikonorov N. and Glebov L. (S.I. Vavilov State Optical Institute, USSR) first proposed the use of PCG/MCG for recording volume phase holograms [5–8]. In this case, only one stage of photo-thermo-induced crystallization of glass was used – “irradiation and heat treatment”, in which the main attention was paid not to the cone shape of microcrystals and the shift of absorption spectra, but to the difference in the refractive indices of the crystalline and glassy phases. This difference was used to record volume phase holograms, including Bragg gratings. Moreover, a “struggle” was waged with the cone shape in order to reduce the size of the nanocrystals and weaken the contribution of scattering in the recorded phase holograms. Thus, the team from State Optical Institute proposed a new brand for this class of holographic materials – “photo-thermo-refractive glass” (PTR glass), i.e. glass in which the refractive index changes as a result of irradiation and subsequent heat treatment. This name became entrenched in the holographic community, it replaced the names PCG and MCG and began to be actively used in our country [1, 2] and abroad [9].

Over the past 20 years, two scientific groups of ITMO University (St. Petersburg, Russia) and the Optigrate company (Orlando, USA) have conducted and are currently conducting competitive research and development of both PTR glass itself and elements and devices for photonics, sensors, lasers, phosphors, etc. Increased attention to PTR glasses is primarily due to their physicochemical properties and the ability to produce volume diffractive optical elements for different functionality.

The following advantages of PTR glasses and holograms based on them can be noted [1, 2]. Holograms (including Bragg gratings) can be recorded at great depths (0.1 – 10 mm). The recorded elements have high diffraction efficiency (up to 99.9 %), as well as angular (less than 0.1 mrad) and spectral (less than 0.01 nm) selectivity. Holograms recorded in PTR glass have high chemical resistance, mechanical and thermal strength, which are similar to commercial K8 (BK7) optical glass. In addition, they can withstand exposure to powerful continuous and pulsed laser radiation. The optical breakdown thresholds of PTR glass are close to the breakdown thresholds of commercial BK7 optical glass: 30–40 J/cm² for pulsed irradiation (8 ns, $\lambda = 1064$ nm) and 100 kW/cm² for continuous irradiation ($\lambda = 1095$ nm). It is also worth noting

that holograms can withstand repeated heating to high temperatures (500°C) without losing their properties [1, 2].

The advantage of PTR glasses as a material for recording holograms is also its homogeneity (fluctuations of the refractive index in the volume do not exceed 10^{-5}) and reproducibility of characteristics both during the synthesis of the original glass (like optical glass K8/BK7) and during photo-thermal-induced crystallization. PTR glass allows the use of traditional methods of mechanical processing – grinding and polishing, as well as various forming technologies (for example, pressing, molding and creating aspherical surfaces). It is also possible to draw optical fiber from PTR glass. The production of PTR glass can be carried out both in laboratory (up to 5–10 kg) and industrial (up to 300 kg) conditions using simple and non-toxic technology. Moreover, the chemical reagents necessary for glass synthesis are commercially available and inexpensive.

It should also be noted that there are some properties of PTR glasses that are unusual for recording media. Thus, PTR glasses contain an alkaline component (sodium ions), and ion exchange technology is applicable to such glasses. For example, it is possible to replace sodium ions in PTR glass with silver, potassium, rubidium, and cesium ions from an external source – molten salt. This technology makes it possible to increase the refractive index ($\Delta n = 10^{-3}$) on the surface of PTR glass and create ion-exchange optical Ag^+ , K^+ , Rb^+ and Cs^+ waveguides, as well as strengthen the surface due to compressive diffusion stresses [1, 10]. Ion exchange technology makes it possible to increase the mechanical, thermal and optical strength of PTR glass, as well as its chemical resistance.

It was shown in [11] that the etching rate of the crystallized region of the material is 10-15 times higher than the etching rate of the original glass. This effect makes it possible to create three-dimensional mini- and microfluidic structures in the volume of PTR glass.

The work [12] shows the possibility of doping PTR glasses with rare earth ions (neodymium, ytterbium, erbium), which opens up the possibility of recording Bragg gratings directly inside the active medium, i.e. allows us to create lasers with distributed Bragg reflectors and distributed feedback.

One more interesting feature of PTR glass should be noted. The composition of PTR glass includes silver ions. Silver ions can be transformed into silver molecular clusters by UV irradiation and subsequent heat treatment at low temperatures (below T_g). These clusters exhibit highly intense luminescence in the visible range of the spectrum when exposed to UV radiation. This approach makes it possible to distribute luminescent centers in the volume of PTR glass and, accordingly, obtain a luminescent image, i.e. we can create luminescent patterns of complex architecture.

Silver ions can also be introduced into the surface layers of PTR glass by ion exchange with the subsequent formation of silver molecular clusters during

heat treatment. This approach makes it possible to create luminescent waveguides [13].

Silver ions can also be transformed into silver metallic nanoparticles by UV irradiation and subsequent heat treatment at high temperatures (close T_g). Such plasmonic structure can be used as a portable and low-cost sensors for chemical and bio-detection. These sensors are based on surface-enhanced Raman scattering (SERS) with the use of plasmonic nanoparticles.

Silver metallic nanoparticles can also be formed on surface of PTR glass by ion exchange. This approach makes it possible to fabricate plasmonic waveguides that can be used for photocatalytic applications (decomposition of water into hydrogen and oxygen, as well as purification of air and water from pollution).

An important factor is that PTR glass allows for a combination of photo-thermo-induced crystallization, ion exchange and etching. Those, it is possible to create optical, luminescent and plasmonic waveguides both on the surface of PTR glass and inside hollow structures.

The noted features of PTR glasses make it possible to classify it as a multifunctional material and to develop on its basis a wide range of holographic optical elements and devices for photonics, laser technology and metrology.

We can note the contribution of Optigrate (in 2018, this company became part of IPG, USA) and Ondex (USA) in creating commercial production of diffractive optical elements for laser technology based on PTR glass. First of all, this is the production and release to the market of a wide line of ultra-narrowband spectral and spatial filters, WDM devices, high-power laser beam combiners, chirped gratings for compressing light pulses, filters that increase the spectral brightness of laser diodes, filters for stabilizing the wavelength of laser diodes, etc. [14].

ITMO University also made a significant contribution to the development of PTR glass itself and a new generation of element base for photonics. Such developments, first of all, include the study of the processes of photo-thermo-induced crystallization and the mechanisms of changes in the refractive index of classical “fluoride” PTR glass [1]. These studies formed the basis for the creation of new PTR glasses. These include the development of “bromide” and “chloride” PTR glasses, which have a positive refractive index change, compared to “fluoride” PTR glasses, which have a negative refractive index change.

ITMO University has reproduced [1] almost the entire line of holographic products produced by Optigrate [14] and Ondex. The following additional developments should also be highlighted:

- ultra-narrowband spectral filters with a bandwidth of 5 pm to increase the spectral brightness and temperature stabilization of the wavelength of laser diode radiation (together with A.F. Ioffe Physico-technical Institute of RAS);

- holographic prisms based on multiplex Bragg gratings (more than 20 gratings recorded in a single volume) for calibrating high-precision angular instruments (together with the company of “Electropribor”);
- holographic marks for collimator holographic sights;
- basic elements for augmented reality eyeglasses based on the approach of monolithic integration of a waveguide plate made in PTR glass with multiplex holograms recorded in it for input and output of information (together with N.E. Bauman MSTU);
- luminescent waveguides and temperature sensors;
- plasmonic waveguides, SERS sensors for chemical and bio-detection, and photocatalyzers;
- lasing was obtained in laser PTR glasses activated with neodymium, erbium and ytterbium, which opens up the possibility of implementing in glass the ideology of monolithic integration of Bragg gratings and a laser medium (by analogy with semiconductor lasers with distributed feedback).

Thus, we can conclude that multifunctional PTR glasses have a great potential as a holographic, ion-exchangeable, luminescent, plasmonic and laser medium, and, undoubtedly, such materials will be in demand when creating new generation photonic elements and devices.

This work was supported by the Russian Science Foundation (project 20-19-00559).

1. N. Nikonorov, S. Ivanov, E. Musikhina, *Optical Journal*, **90**, №3, 68 (2023).
2. N. Nikonorov, S. Ivanov, V. Dubrovin, et al. *Holographic materials and optical systems*, InTech, 2017.
3. S.D. Stookey, G.H. Beal, J.E. Pierson, *J. Applied Physics*, **49**, №.10, 5114 (1978).
4. E.I. Panysheva, I.V. Tunimanova, V.A. Tsekhomskii, *Physics and Chemistry of Glass*. **16**, №. 2, 239 (1990).
5. L.B. Glebov, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, I.V. et al., *Proceedings of VII All-Union Conference on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials*, Riga: Latv.SSR, **2**, 527 (1989).
6. L.B. Glebov, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, et al., *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, **314**, № 4, 849 (1990).
7. S.A. Kuchinskii, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, et al., **70**, № 6, 1296 (1991).
8. L.B. Glebov, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, et al., *Optics and Spectroscopy*, **73**. № 2, 404 (1992).
9. O.M. Efimov, L.B. Glebov, L.N. Glebova, et al., *Applied Optics*, **38**, № 2, 619 (1999).
10. Y.M. Sgibnev, N.V. Nikonorov, V.N. Vasilev, et al., *Journal of Lightwave Technology*, **33**, № 17, 3730 (2015).

11. Y. Sgibnev, N. Nikonorov, A. Ignatiev, et al., *Optics Express*, **24**, № 5, 4563 (2016).
12. V. Aseev, V. Nikonorov, *J. Optical Technologies*, **75**, 676 (2008).
13. Y. Sgibnev, B. Asamoah, N. Nikonorov, et al., *Journal of Luminescence*, **226**, 117411 (2020).
14. <https://www.optigrate.com>

PHASE NANOHOMOGENEITIES IN OXIDE GLASSES AND FUNCTIONAL MATERIALS BASED ON THEM

G.Yu. Shakhgildyan, V.N. Sigaev

D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology of Russia, Moscow
E-mail: georgiy.shahgildyan@gmail.com

Phase nanoinhomogeneities, significantly different in composition and structure from the surrounding glassy matrix, have a great impact on its properties. The formation of phase nanoinhomogeneities is of particular importance for the development of new optical materials based on oxide glasses capable of exhibiting specific nonlinear optical, spectral-luminescent and other properties. The targeted formation of phase nanoinhomogeneities in glasses opens up new opportunities for the development of optical materials with controlled properties. However, despite a significant amount of research devoted to the development of new optical glasses and modeling of their structure [1], there is still no complete description of the typology of these inhomogeneities and methods of their formation. This paper presents an overview of phase nanoinhomogeneities, the directed formation of which will contribute to the development of optical materials with specified properties and unusual combinations of them.

I. The phenomenon of stable and metastable phase separation in glass-forming oxide systems, known for many decades, has always attracted attention as an interesting object of research, preceding the appearance of other functional phase inhomogeneities (in the form of nano- and microcrystals or nanopores). Modern research shows that phase separation itself can lead to the formation of phase inhomogeneities that affect the properties of optical materials. For example, it was demonstrated a significant increase in the mechanical properties (tensile strength, microhardness, etc.) of optically transparent glasses due to the thermally induced formation of a phase separated structure [2–3]. Amorphous phase nanoinhomogeneities formed in glasses of the $\text{Me}_2\text{O-Nb}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ (Me=Li, Na, K), $\text{K}_2\text{O-TiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ and others systems impart nonlinear optical properties to optical materials, manifested in second harmonic generation [4-6], and work [7] showed that weak quadratic optical nonlinearity is generally characteristic of glasses liquidated on the nanoscale. Initiating phase separation in glasses of the $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system with AuCl_3 additives makes it possible to control the position of the localized plasmon resonance band of the precipitated gold nanoparticles, ensuring a shift of the band maximum in the range of up to 1000 nm [8]. This effect is achieved due to the localization of nanoparticles in phase separated regions, which change the behavior of surface plasmons in gold nanoparticles and contribute to broadening the plasmon resonance spectrum.

II. The formation of nanocrystals of various natures in glasses is one of the most common methods for creating functional phase nanoinhomogeneities that provide new properties of glasses and their fine tuning. The classical approach is the widely used glass-ceramic technology, which makes it possible

to obtain a wide range of glass-crystalline materials, including transparent ones, and, in particular, to form dielectric, semiconductor or metal nanocrystals in the volume of glass [9], and by modifying the composition of the glass one can significantly control the properties material. For example, additions of up to 4.5 mol.% Al_2O_3 to gallium-germanosilicate glass significantly affect the formation of $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanocrystals, increasing their concentration and “freezing” their sizes, which leads to a manifold increase in the luminescence intensity of the materials [10]. A classic example of the influence of crystallization catalysts (TiO_2 , ZrO_2) on the formation of the phase composition and properties of glass ceramics are glass ceramics based on the $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system. It is the addition of catalysts that provides the possibility of the nucleation and growth of target eucryptite-like phases and fine control over the values of the coefficient of thermal expansion in glass ceramics of the $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system [11-12]. Spatially selective heating of glasses using femto- and picosecond laser beams allows the formation of functional nanocrystals in a given region, opening the way for the creation of waveguide and three-dimensional photonic structures within the volume of a glassy matrix. It was showed in [13-14] that crystalline waveguides that generate the second optical harmonic can be formed in the volume of glass by direct laser writing, and the formed crystals can have a one-sided or two-sided cross-section. Recently, the possibility of laser formation of perovskite-like nanocrystals in glass was demonstrated, the chemical composition of which varies depending on the laser processing modes. This makes it possible to tune the position of the maximum of the luminescence band in the range from 470 to 700 nm [15], creating micro-sized LEDs and high-resolution displays. The point formation of nano-sized defects of various nature opens up opportunities for the development of methods for ultra-dense recording and unlimited long-term storage of data in glasses, as well as the design of radially polarized vortex beam micro-converters [16–17]. Spectral-luminescent properties initiated locally during the formation of phase nanoinhomogeneities in the form of clusters, metal nanoparticles or quantum dots [18], open the way to multidimensional data coding using different bit depths of the luminescence intensity of nanostructures. For example, the possibility of creating optical memory by laser writing of silver clusters in borate glass, with a capacity of more than 10 Gb/cm^3 , was recently demonstrated [19].

III. Porosity, which is usually not characteristic of glasses, can also be considered as a functional phase nanoinhomogeneity that significantly affects the properties of optical materials. The formation of silver or gold nanoparticles in the pores of nanoporous silicate glasses opens up the possibility of creating effective substrates for giant Raman spectroscopy used to detect ultra-low concentrations of substances [20]. The deposition of transition metal ions in the pores allows, with subsequent temperature consolidation, the formation of oxide glasses with a high content of activators [21]. Nanopores play an important role in laser recording of functional objects: densification of the porous structure allows the creation of waveguide architectures with high spatial resolution [22],

and the ability to quickly and reproducibly form nanostructures with high phase delay values makes porous glass a promising candidate for data writing and storage [23].

These examples demonstrate the potential of phase nanoinhomogeneities in the development of new optical materials with a wide variety of properties combinations. At the same time, despite the described potential advantages, glasses with phase inhomogeneities remain a complex object from a technological point of view, contradicting the fundamentals of optical materials science, which requires the material to have the highest possible degree of homogeneity on the macro-, meso- and microscales. However, structural inhomogeneities on the nanoscale, in many cases, may not affect the properties of the optical material, introducing additional functionality into it. In this regard, the experience of industrial development of transparent glass ceramics based on the $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system, as well as the experience of industrial production of photothermorefractive glasses with silver nanocrystals in the structure, demonstrates the possibility of scaling approaches to the production of glasses with phase nanoinhomogeneities. Expanding our understanding of the processes of their formation and developing new methods for initiating and controlling their growth continues to be an important task in optical materials science.

1. K A. Kirchner et al., *Chem. Rev.* **123(4)**, 1774-1840 (2022).
2. Q. Zhang et al., *J. Non-Cryst. Solids.* **595**, 121806 (2022).
3. G.G. Santos et al., *J. Am. Ceram. Soc.* **106(1)**, 596-612 (2022).
4. V.N. Sigaev et al., *J. Non-Cryst. Solids.* **306(3)**, 238-248 (2002).
5. V.N. Sigaev et al., *J. Non-Cryst. Solids.* **292(1-3)**, 59-69 (2001).
6. V.N. Sigaev et al., *Integr. Ferroelectr.* **61(1)**, 249-253 (2004).
7. V.N. Sigaev et al., *J. Non-Cryst. Solids.* **306(3)**, 238-248 (2002).
8. G.Yu. Shakhgildyan et al., *Ceramics.* **7(2)**, 562-578 (2024).
9. Q. Pan et al., *Prog. Mater. Sci.* **130**, 100998 (2022).
10. N.V. Golubev et al., *Ceram. Int.* **49(2)**, 1657-1666 (2022).
11. I. Mitra, *Opt. Mater. Express.* **12(9)**, 3563-3576 (2022).
12. A.S. Naumov et al., *Ceramics.* **7(1)**, 1-14 (2023).
13. A.S. Lipatiev et al., *Cryst. Growth Des.* **17(9)**, 4670-4675 (2017).
14. A. Stone et al. *Mater., Des.* **146**, 228-238 (2018).
15. K. Sun et al., *Science.* **375(6578)**, 307-310 (2022).
16. Y. Shimotsuma, et al., *PRL.* **91(24)**, 247405 (2003).
17. S.S. Fedotov et al., *Appl. Phys. Lett.* **108(7)**, (2016).
18. G.Yu. Shakhgildyan et al., *Ceram. Int.* **47(10)**, 14320-14329 (2021).
19. A.S. Lipatiev et al., *ACS Appl. Nano Mater.* **5(5)**, 6750-6756 (2022).
20. A.S. Pshenova et al., *Plasmonics.* **14(1)**, 125-131 (2019).
21. E.A. Plastinin et al., *J. Non-Cryst. Solids.* **579**, 121369 (2022).
22. Z. Lijing et al., *Nanomaterials.* **11(1)**, 123 (2021).
23. S.S. Fedotov et al., *Opt. Lett.* **45(19)**, 5424-5427 (2020).

NEW ORGANIC AND HYBRID MATERIALS FOR PHOTONICS

O. B. Petrova

D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology of Russia, Moscow

E-mail: petrova.o.b@muctr.ru

Organic semiconductor materials have been rapidly expanding their applications over the past 10 years. The greatest progress is observed in the field of electroluminescent materials for information display devices – OLED displays, illuminators, smart OLED fabrics.

The requirements for the stability of spectral and brightness characteristics both from batch to batch and during operation turned out to be possible to meet only when organic semiconductors approached 5N in chemical purity, which today is the lower limit for inorganic semiconductors. Analysis of the dynamics of development of high-purity semiconductor materials showed that it took inorganic semiconductors about 40 years to replace 5N drugs with higher purity ones. According to this indicator, organic semiconductors are in the initial stage of their development. In addition to purity in terms of impurities, the presence of isomers and polymorphism turned out to be very important parameters. Different polymorphs can exhibit luminescence with different wavelengths and intensities [1].

Some of the most common luminescent materials for OLED devices are metal complexes with various organic ligands. It is worth noting that foreign literature classifies such compounds as inorganic chemistry, but in our country the classification has not yet been established, but tends to be the same.

Luminescent metal complexes can be divided into complexes with ligand-centered and metal-centered luminescence. Complexes with ligand-centered luminescence typically exhibit broad luminescence bands caused by transitions between the lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) and the highest occupied molecular orbital (HOMO). Such complexes contain identical or unequal ligands, and the best known of them are 8-hydroxyquinolates of metals of groups I, II and III of the periodic table. In complexes with metal-centered luminescence, non-radiative energy transfer occurs from the ligands to the excited electronic levels of the central metal ion, followed by luminescence characteristic of this ion. This phenomenon is called the “antenna effect”. Among metal-centered phosphors, Eu^{3+} complexes with red luminescence can be distinguished. In order to increase the resolution of luminescent transitions in rare-earth ions, they try to obtain complexes asymmetrical, i.e. containing ligands of different donor-acceptor nature [2].

One of the problems with the widespread use of metal complex materials in photonics is their lower stability in the environment than inorganic phosphors. One method of protection is the creation of hybrid materials (HM), combining organic and inorganic substances at the molecular level. HM's contain either inorganic nanoparticles in an organic, for example, polymer matrix, or, conversely, ensembles of organic nanoclusters in an inorganic matrix [3]. Based

on this criterion, they are classified into inorganic-organic and organic-inorganic, respectively [4].

Organic-inorganic hybrid materials are widely used in new devices of passive, active and integrated optics and photonics [5]. The main studies of hybrid materials are devoted to the introduction of organic functional nanocomponents into such inorganic matrices as silicate glasses, silicon oxide nanospheres, thin amorphous films, xerogels, layered double hydroxides, and single crystals. The most promising seems to be the use of luminescent coordination metal complexes, especially those based on rare earth elements. A comparison of the luminescent properties of GM doped with organic complexes of the corresponding elements (Nd, Eu, Tb, Sm) with the same materials into which additives were introduced in the form of inorganic compounds showed a significant increase in efficiency.

The main methods for creating HM are solution methods, primarily sol-gel [6], growth from solution of inorganic crystals with the capture of an organic component, template synthesis, as well as gas-phase methods - vacuum deposition, atomic layer deposition. The Department of Chemistry and Crystal Technology of the Mendeleev University of Chemical Technology has developed several original methods for obtaining HM:

1. Melt technique. This technique was tested on a wide range of phosphors, both 8-hydroxyquinolates and metal β -diketonates, individual organic ligands, and low-melting lead fluoroborate glass matrices. The technique consists of placing a phosphor in a glass melt, while the phosphor is subjected to short-term (10-30 s) high-temperature (500–550 °C) exposure without oxygen, which leads to partial destruction of the organic component and an exchange reaction with elements of glass [7].

2. Sputtering of thin layers and subsequent laser processing. This technique was tested mainly on aluminum tris-(8-hydroxyquinolate) Alq_3 and matrices B_2O_3 , PbF_2 , PbO . Laser processing was carried out with both continuous and pulsed femtosecond lasers. The phosphor is heated by vacuum thermal spraying and then laser irradiated. At low laser energies, an exchange reaction occurs, and at high laser energies, the thin film is destroyed [8].

3. Co-precipitation from aqueous-alcoholic solutions. This method has been tested on a wide range of phosphors and matrices LiF , PbF_2 , BaF_2 , SrF_2 , CaF_2 , ZnF_2 , LaF_3 , $\text{PbF}_2\text{-YF}_3$, $\text{PbF}_2\text{-LaF}_3$, $\text{PbF}_2\text{-YbF}_3$, $\text{CaF}_2\text{-YF}_3$, etc. Co-precipitation was performed with hydrofluoric acid and ammonium fluoride from solutions of soluble salts of the corresponding metals and organic components. The temperature effect in this method is minimal, but there is exposure to a chemically aggressive environment, which can lead to the incorporation of functional groups into organic fragments (fluorination, nitration) [9].

4. Solid-phase synthesis. Tested on 8-hydroxyquinolates of lithium Liq and zinc Znq_2 and others and matrices PbF_2 , PbO , CaF_2 , ZnO , LaF_3 , $\text{PbF}_2\text{-YF}_3$, $\text{PbF}_2\text{-LaF}_3$, $\text{PbF}_2\text{-YbF}_3$. This method allows varying the temperature and

processing time, and leads to the same exchange reaction producing the same optical centers as other techniques [10].

5. Aerogel method. Destruction (resinization) of the organic component in the sol-gel process occurs mainly during prolonged drying of the gel. Drying under supercritical conditions allows the process to be carried out much faster. Such drying makes it possible to obtain a new material – aerogels with extremely developed porosity. The production of luminescent aerogels opens up wide possibilities for their use as effective sources of scattered light. HM's were obtained on the basis of SiO₂-aerogel and 8-hydroxyquinolates of aluminum Alq₃, boron Bq₃, calcium Caq₂, β-diketonates Eu and Yb. The resulting aerogels exhibit effective luminescence in the entire visible range (allowing the creation of an RGB device) and in the IR [11].

6. Capillary method. Methods of liquid-phase deposition of thin films are more economical than vacuum deposition methods and allow the deposition of large-area films: these are methods of dipping, spin-coating and capillary deposition. Moreover, capillary application ensures almost 100% use of the original substance. Hybrid films were obtained by the capillary method both from HM previously synthesized by the solid-phase method (for example, CaF₂+Liq), and by carrying out the reaction directly in the thickness of the deposited film with thermal or microwave activation of the reaction. Such film luminescent HM's can find wide practical application as marking components [12].

Summarizing the methods used for the synthesis of HM, we can say that various methods make it possible to obtain bulk, powder or thin-film HM with different properties. In terms of intensity, the best performance is achieved by solid-phase synthesis, the capillary method of film deposition and the aerogel method. This is partly due to the fact that these methods provide the best transfer of the organic phosphor into the target product. Thus, with the melt method, thermal destruction occurs of more than two-thirds of the organic component; in the sol-gel method with long-term drying, resinization occurs. During co-precipitation, the phosphor is washed out. With vacuum deposition, spraying past the substrate.

1. R.I. Avetisov et al., Doklady Chemistry. **454**. № 1. 6-8 (2014).
2. V. K. Brel et al., Mendeleev Communications. **34**. 329–331 (2024).
3. P.P. Banerjee et al., Applied Optics. **52**. № 22. HM1-HM3 (2013).
4. M. Carraro et al., Materials. **7**. 3956-3989 (2014).
5. B. Lebeau, Chem. Soc. Rev. **40**. 886–906 (2011).
6. Kuznetsova R.T. et al., Opt. and Spectr. **102**. № 2. 208-217 (2007).
7. O. B. Petrova et.al., Opt. Mat. **69**. 141–147 (2017).
8. R. Saifutyarov, et.al., Phys. Stat. Sol. (A) Appl. and Mat. Sc. 1800647. (2019).
9. P. V. Strekalov, et.al., Tsvetnye Metally. № 10. 25–31 (2021).
10. K.I. Runina, et al., Adv. in chem. and chem. techn. **34**. № 4 (227). 80–82 (2020) (in Russian).
11. R. Avetisov, et al. Molecules. **27**. № 16. 5224 (2022).
12. M. Zykova, et.al. Applied Physics A. **128**. № 3. 240 (2022).

SYNCHROTRON RADIATION AND LUMINESCENCE SPECTROSCOPY OF RELEVANT SCINTILLATORS

V. Pankratov¹

¹*Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Riga, Latvia*
E-mail: vpank@latnet.lv; vladimirs.pankratovs@cfi.lu.lv

After its discovery in 1946/47, it took about 15 years until synchrotron radiation (SR) was systematically used for spectroscopy. From that time many spectroscopic methods under SR excitations have been developed. However, the tuneability of SR and its inherent well-defined time structure makes it particularly well suited for time-resolved luminescence studies. Nevertheless, the first pioneering work was published only in 1970 reporting the luminescence spectroscopy experiments under SR excitations. The measurements were performed at TANTALUS storage ring (Wisconsin, USA). Afterwards, luminescence activities at other synchrotron centers around the world started. Since 1970 luminescence spectroscopy experiments have been carried out for instance at Tokyo synchrotron (Japan), at synchrotron center of Lebedev Physical Institute (Moscow, USSR), at ACO storage ring (Orsay, France), MAXLAB (Lund, Sweden), UVSOR (Okazaki, Japan) and others. However, the most successful and significant luminescence experiments under SR were performed at SUPERLUMI setup. The SUPERLUMI endstation was constructed and developed as a user facility in 1981 at DORIS III storage ring of HASYLAB at DESY (Hamburg, Germany) and it was a flagship experiment for three decades [1, 2].

In the present lecture, after brief introduction about SR the pioneering luminescence experiments are illustrated. The exciting development is demonstrated presenting highlights for the whole period from the beginning to the present day. The highlights are taken from fields like exciton self-trapping, inelastic electron–electron scattering, cross luminescence, or probing of nanocluster properties with luminescence spectroscopic methods. More technological aspects play a role in present day's experiments, like quantum cutting in rare-earth-doped insulators.

Next, a few ideas concerning the future development of luminescence spectroscopy with SR will be sketched. The main attention will be paid to the new luminescence setup – FINESTLUMI [3] that was installed in 2019 on the Finnish-Estonian beamline (FinEstBeAMS) [4,5] of the 1.5 GeV storage ring at MAX IV Laboratory (Lund, Sweden). Currently, this setup along with new SUPERLUMI beamline at DESY synchrotron in Hamburg (Germany) are actively utilizing by many user groups within and outside of Europe. The recent experiments as well as the recent significant results [6-10] obtained at FINESTLUMI for novel luminescence materials and prospective scintillators will be demonstrated and discussed. Special attention will be paid on the analysis of excitation spectra in vacuum ultraviolet (VUV) and soft X-rays (XUV) spectral range where multiplication of electronic excitation processes

occur. The role of these processes in the luminescence efficiency in heavily irradiated scintillator crystals will be elucidated.

Finally, the advantages of luminescence spectroscopy under synchrotron radiation excitations will be demonstrated in the study of radiation damages in some relevant scintillator materials. The intensive studies of excitons and their non-radiative evolution channels with the creation of elementary Frenkel defects in alkali halides and other compounds have been done during last two decades demonstrating huge potential of VUV synchrotron excitations [11, 12]. Radiation defects creation had been revealed for several mechanisms: caused by the decay of anion excitons, by the recombination of hot electrons and holes and by the decay of cation excitons.

1. G. Zimmerer, *Rad. Measur.* **42**, **859** (2007)
2. V. Pankratov and A. Kotlov, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B* **474**, 35 (2020)
2. V. Pankratov, R. Pärna, M. Kirm, et al., *Radiation Measurements* **121**, 91 (2019)
3. K. Chernenko, A. Kivimäki, R. Pärna, et al., *Journal of Synchrotron Radiation* **28**, 1620 (2021)
4. R. Pärna, R. Sankari, E. Kukk, et al., *Nucl. Inst. Meth. A* **859**, 83 (2017)
5. A.P. Kozlova, V.M. Kasimova, O.A. Buzanov, et al., *Results in Physics* **16**, 103002 (2020)
6. A. Shalaev, R. Shendrik, A. Rusakov, et al., *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B* **467**, 17 (2020)
7. V. Pankratova, A.P. Kozlova, O.A. Buzanov, et al., *Scientific Reports* **10**, 20388 (2021)
8. E. Radzhabov, R. Shendrik, V. Pankratov, *Journal of Luminescence* **252**, 119271 (2022)
9. E. Radzhabov, R. Shendrik, V. Pankratov, et al., *Optical Materials* **135**, 113235 (2023)
10. A. Lushchik et al., *Nucl. Instrum. Meth. B* **166–167**, 529 (2000)
11. A. Lushchik, *Phys. Rev. B* **53** 5379, (1996)

LASER THERMAL DENSIFICATION OF NANOPOROUS GLASSES

Y.V. Spitsyna, A.S. Lipatiev, S.I. Stopkin, Yu.V. Mikhailov, S.S. Fedotov,
I.S. Glebov, V.N. Sigaev

D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology of Russia, Moscow
E-mail: julyana2001@yandex.ru

Recently, there has been an increasing interest in porous glass (PG), which finds practical applications in creating photonic element matrices, active laser media, and optical memory [1]. However, PG is thermodynamically unstable medium due to their strongly developed surface, high free energy, the presence of nonclosed -Si-O-bonds. So, this material has a high tendency to adsorb gases from the environment, which leads to changes in the optical properties of the glass over time.

In this work, the formation of a homogeneous defect-free and porosity-free layer on the surface of PG has been demonstrated by exposing the surface to CO₂-laser radiation. For this purpose, high-speed [2] and low-speed [3] modes of laser surface heat sealing were considered. After optimization of laser exposure modes, a layer of porous glass was formed on the surface, the tightness of which was confirmed by applying a drop of distilled water to the heat-sealed area, which remained on the surface without being absorbed into the porous structure of the sample (Fig. 1). The possibilities of both recording birefringent voxels by femtosecond laser pulses in the PG volume through a thermally compacted surface and thermally compacting the PG with pre-recorded voxels are shown.



Fig. 1. A photograph of the surface of a laser-densified PS sample taken a few minutes after the application of a drop of water.

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-10231.

1. A. S. Lipatiev et al., *Applied optics*. **57**, 4, 978-982 (2018).
2. J. Hildebrand et al., *Physics Procedia*. **12**, 452-461 (2011).
3. K. Wissenbach, *Tailored light 2. Laser application technology*, Springer, 2011.

SYNTHESIS TECHNOLOGY AND OPTICAL PROPERTIES
OF COMPOUNDS OF THE $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – TII SYSTEM

P.V. Pestereva, E.Y. Kabykina, A.E. Lvov, L.V. Zhukova
*Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg
E-mail: p.v.pestereva@urfu.ru*

Due to the fact that an active search and development of a new element base designed for the generation, transmission and reception of infrared radiation is underway, the study of new materials is an urgent task of optical materials science. Currently, materials based on silver halides and monovalent thallium have become the most popular, since they have high transparency in a wide spectral range from visible to terahertz ranges, flexibility, non-hygroscopicity, photostability and high resistance to ionizing radiation. The Scientific Laboratory of Fiber Technologies and Photonics is engaged in the development and research of new optical materials based on solid solutions of the system $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – TII.

The manufacture of optical materials based on solid solutions of the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – TII system includes the process of thermosonic crystallization of synthesis (TSCS), due to which a high-purity charge is obtained with a frequency of cationic impurities of no more than 0,1 ppm, and the process of growing single crystals and synthesis of optical ceramics using the Bridgman method with various technological modes. After that, polycrystalline plates with an optical surface 350 ± 5 microns thick are made from synthesized single crystals and optical ceramics using the method of hot pressing on a manual hydraulic press to study the functional properties of samples [1].

During the manufacture of the plates, the samples showed themselves to be highly flexible, and the single crystals were visually transparent in the visible region. According to the results of the study of the optical properties of single crystals and optical ceramics based on solid solutions of the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – TII system, it was found that single crystals pass in the spectral range from 0,48 to 41,7 microns with transparency up to 70 % without taking into account Fresnel losses, and optical ceramics – from 0,512 to 41,7 microns with maximum transparency up to 50 %. The materials are also resistant to ultraviolet and ionizing radiation. The microhardness of single crystals and optical ceramics was determined using the Vickers method, which ranges from 1,77 to 4,78 depending on the composition at a load of 0,98 N (100 grams).

1. L. Zhukova, D. Shatunova, D. Salimgareev, et al., *Journal of Crystal Growth*. **627**, 127528 (2024).

OXOCHLORIDE LEAD-TELLURITE GLASSES DOPED BY Tm^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} FOR IR PHOTONICS APPLICATIONS

D. Butenkov¹, A. Vasilenkova¹, A. Bakaeva¹, K. Runina¹, K. Veselský^{2,3},
P. Loiko², A. Braud², P. Camy², O. Petrova¹

¹ *D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology of Russia, Moscow*

² *Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique (CIMAP),
UMR 6252 CEA-CNRS-ENSICAEN, Université de Caen Normandie*

³ *Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering,
Czech Technical University in Prague*

E-mail: dabutenkov@gmail.com

The development of materials for the infrared range of the spectrum is an urgent task, since it has a number of important practical applications. One of the promising materials are heavy glasses based on tellurium dioxide doped with rare-earth ions [1].

In the presented study, we investigated the spectral-luminescent properties of $PbCl_2$ - TeO_2 glasses doped with thulium (Tm^{3+}), holmium (Ho^{3+}), and erbium (Er^{3+}) ions at concentrations of 0.65 to 2 mol%. The introduction of lead chloride into the composition of tellurite glasses leads to changes in their structure, which can be seen in Raman spectra (appearance of bands related to Pb-Cl bonds, decrease and redistribution of intensities of bands of structural units based on Te-O bonds). The structural changes are accompanied by a decrease in the phonon energy of the matrix and a decrease in the probability of multiphonon relaxation of excited states of activator ions.

The transmittance range is from 0.4 to 7.5 μm , with the absorption coefficient of OH-groups less than 1.5 cm^{-1} . All absorption bands characteristic of Tm^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} ions are present on the absorption spectra of the glasses. The glasses show intense luminescence in the near- and mid-IR ranges. For the first time, luminescence in a matrix based on oxochloride lead glass was obtained in the 2-3 μm range. The lifetime of excited states of RE^{3+} in glasses of the $PbCl_2$ - TeO_2 system is longer than in similar oxide systems ZnO - TeO_2 and La_2O_3 - TeO_2 [2]. The investigated system is promising for applications in systems operating in the infrared range of the spectrum.

The work was supported by the Innovation Promotion Fund under the UMNİK program (contract No. 18370GU/2023).

1. B. I. Denker et al., *Ap. Phys. B* **124**, 1-8 (2018).
2. Y.X. Zhou et al., *Optoel. Let.*, **8**, № 4, P. 273-276 (2012).

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF GLASSES IN PbCl₂-PbO-B₂O₃
SYSTEM, DOPED BY Nd³⁺

A.V. Bakaeva¹, D.A. Butenkov¹, K.I. Runina¹, A.V. Sud'in², V.S. Tsarev³,
S.N. Ushakov^{2,3}, M.A. Uslamina², A.A. Pynenkov², O.B. Petrova¹,
I.Ch. Avetissov¹

D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology of Russia, Moscow

² *National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk*

³ *Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

E-mail: bakaevanna@mail.ru

Borate glasses containing lead compounds have a complex of unique properties such as strength, low thermal expansion, high refractive index and significant transparency in a wide range of spectra. Oxohalide glasses are very promising for applications as matrix materials for modern laser systems, including fiber laser systems [1].

In this work, 3 series of glasses were synthesized with the general formula $x\text{PbCl}_2-(50-0.5x)\text{PbO}-(50-0.5x-y)\text{B}_2\text{O}_3-y\text{NdF}_3$, where x varied from 0 to 40 mol% in steps of 10 mol%. For the first series, y was 0 mol%, for the second series it was 1 mol%, and the third series corresponded to the general formula $30\text{PbCl}_2-35\text{PbO}-(35-y)\text{B}_2\text{O}_3-y\text{NdF}_3$, where $y=0.1, 0.3, 0.5, 1$ and 2 mol%.

The introduction of PbCl₂ leads to the expansion of the transparency window in the IR region up to 4.7 μm (at 40 mol% of PbCl₂). According to the values of refractive index and the course of optical dispersion, the glasses belong to superheavy flints. The investigated glasses exhibit luminescence typical for Nd³⁺ ions. The contour of the luminescence bands and the lifetime of excited states are influenced by the concentration of PbCl₂ in the glass matrix. A slight hypsochromic shift of the spectral lines of the hypersensitive transition ⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2} from 876 nm to 874 nm with increasing PbCl₂ content from 0 to 40 mol% indicates a change of the environment of Nd³⁺ ions from oxide to more ionic (chloride) [2].

The structure of glasses was investigated. When PbCl₂ is introduced into glasses, PbO₄ groupings are destroyed and PbCl₂ enters the glass mesh through Pb-O-B bridging bonds. Depolymerization and weakening of the glass mesh occurs with the formation of isolated ion-containing structural units. The changes in the structure of the glass mesh lead to significant changes in physicochemical properties and spectral-luminescent characteristics.

1. D. Butenkov et al. *Ceramics* **6**(3), 1348 (2023).
2. E.F. Kustov et al., *Electronic spectra of compounds of rare earth elements*, Moscow, Nauka, 1981.

THE QUALITY OF COLQUIRITE CRYSTALS

E.B. Zheleva^{1,2}, V.V. Semashko^{1,2}, A.A. Shaveliev¹, O.A. Morozov^{1,2},
V.M. Kyashkin³, A.A. Karabutov², Yu.P. Brodnikovskiy²

¹ *Kazan (Volga region) Federal University, Kazan*

² *Zavoisky Physical-Technical Institute, Kazan*

³ *National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk*

E-mail: stillsennin@mail.ru

LiCaAlF₆ (LiCAF) crystals with impurity ions Ce³⁺ and Cr³⁺ are actively used as ultraviolet and infrared laser media, respectively [1–3]. Quality control of crystals at early stages after their synthesis is relevant.

In this work, laser acoustic methods are used for prompt quantitative evaluation of the quality of LiCAF crystals using the UDL-2M flaw detector. This technique provides control at the stage of ground surfaces, which does not require expensive precision processing of crystals in contrast to traditional polarization and interferometric techniques.

The studied samples of LiCAF crystals were grown in Kazan Federal University [4]. It is known [1,5] that in synthesized crystals of this chemical composition anisotropic light scattering on inhomogeneities of different nature is observed, which is successfully eliminated by annealing the samples.

LiCAF crystals were studied by absorption spectroscopy and laser acoustics. All measurements were carried out along the optical axis C. The spatial dependences of the concentration of impurity ions of crystals and the velocities of longitudinal and shear ultrasonic waves (USW) along the crystal growth direction were studied. The spatial dependences of the mechanical constants of the samples and the attenuation coefficient of ultrasonic waves were calculated. It is shown that the ultrasound attenuation coefficient can serve as a parameter that provides operational characterization of the quality of synthesized LiCAF crystals.

The study of acoustic characteristics of LiCAF crystals was performed with the financial support from the government assignment for FRC Kazan Scientific Center of RAS.

1. M.A. Dubinskii, et al., *Journal of Modern Optics* **40**, 1-5 (1993)
2. S.A. Payne, et al., *Journal of quantum electronics* **24**, 2243-2252 (1988)
3. V.V. Semashko, et al., *Phys. Solid State* **47**, 1507–1511 (2005)
4. J.J. De Yoreo, L.J. Atherton, D.H. Roberts, *Journal of crystal growth* **113**, 691-697 (1991)
5. A.A. Shavelev, et al., *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* **11322**, 113221L (2019)

OPTICAL MATERIALS BASED ON SOLID SOLUTIONS OF THE AgCl – AgBr – AgI SYSTEM

D.D. Salimgareev, A.A. Yuzhakova, A.E. Lvov, P.V. Pestereva,
A.S. Korsakov, A.S. Shmygalev, L.V. Zhukova
*Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg
E-mail: d.d.salimagreev@urfu.ru*

The development of infrared and terahertz optical materials for wide-spectrum systems, medicine, IR and THz technology is an urgent task. Promising materials for these applications are single crystals and optical ceramics of the AgCl – AgBr – AgI system developed by the team of authors [1], which are non-toxic, non-hygroscopic, and have high photo and radiation resistance. The high flexibility of these materials makes it possible to manufacture various products based on them by hot pressing (windows, lenses, etc.), and by extrusion – infrared light guides.

Within the range of the AgCl – AgBr – AgI system, the phase diagrams of the AgCl – AgI, AgCl – AgBr, AgBr – AgI systems were refined and new diagrams AgCl – AgBr_{0.7}I_{0.3} and AgCl_{0.25}Br_{0.75} – AgI were studied. The results obtained made it possible to identify areas of homo- and heterogeneity, the compositions of which are suitable for growing single crystals and synthesizing optical ceramics, respectively. According to the studied phase diagrams, optimal technological modes were selected, a high-purity charge was synthesized by the hydrochemical method and single crystals of 3, 8 and 13 mol. % AgI in AgBr, 3 and 6 mol. % AgI in AgCl, 15, 28, 42 and 92 mol. % AgBr_{0.7}I_{0.3} in AgCl, 4, 8, 13, 16 and 20 % AgI in AgCl_{0.25}Br_{0.75}, were grown by the Bridgman method. Optical ceramics compositions of 25 mol. % AgI in AgBr, 70 and 86 mol. % AgBr_{0.7}I_{0.3} in AgCl, 20 and 33 mol. % AgI in AgCl_{0.25}Br_{0.75} were synthesized by the method of directed crystallization. These optical materials have a transmission range in the range from 0.4 to 60.0 microns or more (30.0–5.0 THz) without absorption windows with a maximum transparency of 75–85% and in the range from 300.0 to 1000.0 microns or more (0.3–1.0 THz) with transparency up to 60–65%. Refractive indices in the wavelength range from 3.0 to 14.0 microns range from 2.020 to 2.208. Their high photo- and radiation stability has been confirmed.

Thus, the developed new optical materials are promising for the creation of optical equipment based on them, including for medicine.

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, State Contract no FEUZ-2023-0021 (N687.42B.325/23)

1. L. Zhukova, D. Shatunova, D. Salimgareev, et al., *Journal of Crystal Growth*. **627**, 127528 (2024).

PROPERTIES OF TeO₂-ZnO-La₂O₃-Na₂O-Er₂O₃ SERIES GLASSES
WITH DIFFERENT CONTENTS OF ERBIUM OXIDE

A.R. Sharafeev¹, V.V. Dorofeev^{1,2}, S.E. Motorin^{1,2}, A.V. Kim²,
S.V. Muravyev², M. Y. Koptev², V.V. Koltashev³

¹ *G.G. Devyatikh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,
Nizhny Novgorod*

¹ *A.V. Gaponov IAP RAS, Nizhny Novgorod*

³ *Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*
E-mail: sharafeev@ihps-nnov.ru

The interest in tellurite glasses, including those activated by REE ions as materials of active media of fiber lasers is due to the wide area of glass formation of matrix compositions and the high solubility of rare earth oxides in them, good chemical and crystallization stability, pronounced optical nonlinear parameters, and a wide range of transparency from visible to medium IR [1-3].

To synthesize TeO₂-based glasses of the TeO₂-ZnO-La₂O₃-Na₂O-xEr₂O₃ (TZLNEr), x=0-4 mol.% series, an original method was used to remove hydroxyl groups from the glass-forming melt.

The glass transition temperatures for all studied compositions are close to 300 °C; glasses containing less than 2.3 mol.% Er₂O₃ are extremely resistant against crystallization at a heating rate of 5 degrees, there are no thermal effects of crystallization and melting on thermograms.

The transparency range of thin samples is from ~0.4 and ~6 μm, the characteristic absorption bands of OH-groups with maxima of ~2.3; 3.3 and 4.4 microns are not distinguished for the most dehydrated glasses. An increase in Er₂O₃ concentration does not lead to a noticeable change in the boundaries of transmission region, but it does increase the absorption intensity in the characteristic bands of Er³⁺ ion.

By excitation at 975 nm, the luminescence bands of Er³⁺ near 1.55 and 2.75 microns corresponding to the electronic transitions ⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2} and ⁴I_{11/2}→⁴I_{13/2} were studied. The intensity and lifetime of the luminescence increase with the concentration of erbium oxide and with a decrease in content of hydroxyl groups.

Laser generation at a wavelength of ~2.7 μm has been experimentally demonstrated in fibers with erbium ions activated cores [2].

Acknowledgments: The work is supported by the Center of Photonics, a Center of Excellence funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (075-15-2022-316).

1. S. V. Muravyev, et al., *Sci. Rep.* **8**, 16164 (2018),
2. S. V. Muraviev, et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, V. **35**, n. 24, pp. 1435-1438 (2023).
3. V.V. Dorofeev et al., *J. Non-Cryst. Solids* **357**, 2366–2370(2011).

INVESTIGATION OF THE SOLUBILITY OF IRON
IN NONSTOICHIOMETRIC ZnS FOR THE IMPROVEMENT
OF ELECTRONICS AND PHOTONICS MATERIALS

K.G. Kim, K.A. Potapova, E.N. Voronina, S.S. Zykova, E.N. Mozhevitina,
I.Ch. Avetissov

D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology of Russia, Moscow
E-mail: karina.kim.2002@inbox.ru

Zinc sulfide is a broadband A^{II}B^{VI} group semiconductor. This material is used for the manufacture of cathode tubes, emission displays, scintillators [1], as well as multilayer coatings material in optics [2]. The introduction of Fe ions into the ZnS structure makes it possible to convert the spectral range into the IR region and to create wide absorption and emission bands of semiconductors [3].

The initial crystalline ZnS, provided by the Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the Russian Academy of Sciences (ICHPS RAN), was obtained by the CVD method. ZnS had a cubic sphalerite structure (*F43m*). ZnS was preferably ground in an agate mortar under an argon atmosphere. The purity of the ZnS preparation was better than 99.999 wt %, excluding gas-forming impurities. The preparation of FeS was synthesized in advance according to the method described in [4]. Studies of the solubility of Fe in ZnS were carried out under bivariant equilibrium conditions. Annealing was carried out in quartz ampoules, pre-evacuated to a pressure better than 10⁻³ Pa and hermetically sealed. The synthesis of nonstoichiometric preparations was carried out at 1323 K. The fast throw of ampoules into cold water after annealing made it possible to „freeze“ the high-temperature equilibrium. The analysis of dissolved Fe was carried out by the MS-ICP method. The concentrations of Fe dissolved in ZnS preparations are shown in Table 1.

Table 1 – Results of Fe solubility in FeS at 1323 K

T _{ZnS} , K	T _{FeS} , K	X _{Fe} ^{solv} wt %
1323	1005	2.4×10 ⁻³
1323	1256	2.6×10 ⁻³

1. J. P. Borah, J. Barman, K. C. Sarma, Chalcogenide Lett. **T. 5**, C. 201-208, №. 9 (2008).
2. S. K. Shikh. Development of technology for creating a protective coating based on zinc sulfide for holographic images (2012).
3. K.E. Fedorovich, K.I. Sergeevich, Alternative Energy and Ecology, C. 150-166, **10-11** (2015)/
4. K.A. Potapova, Z.A. Balandina, M.P. Zykova, et al., Advances in chemistry and chemical technology. **256**, №7 (2022).

NEW OPTICAL MATERIALS ON THE BASIS OF HARD SOLVES OF $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ - AgCl SYSTEMS

V.M. Kondrashin,

*Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg
E-mail: l.v.zhukova@urfu.ru*

Polycrystalline IR light guides made of single crystals of KRS-5 (solid solutions of thallium halides $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$) are known to be transparent in the range from 0.5 to 45 μm [1]. However, they are not widely used due to rapid degradation caused by recrystallization of grains. Therefore, the search for new materials transparent in a wide spectral range, stable under the action of radiation, and non-degradable with time is an urgent task today.

The team of the scientific laboratory "Fiber Technologies and Photonics" of UrFU in continuation of research of materials based on silver and thallium halides [2], built and studied the phase diagram of melting of solid solutions of the system $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ – AgCl , presented in Figure 1.

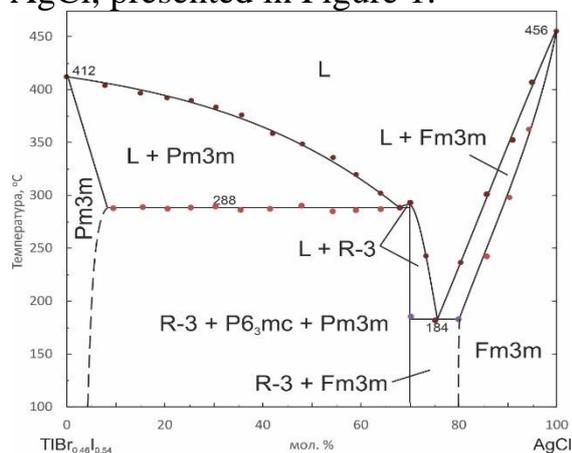


Fig. 1. Phase diagram of the system $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ - AgCl

Single crystals with compositions of 90, 95, 98 mol % AgCl in $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ were grown, optical ceramics with compositions of 6, 18 and 98 mol % AgCl in $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ were synthesized. New single crystals and ceramics of the system $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ – AgCl are transparent up to 80 % without absorption windows in the spectral range from 4.0 to 55.0 μm .

1. T. Katsuyama, H. Matsumura, Infrared fiber-optic light guides / T. Katsuyama, H. Matsumura ; transl. from English by V. G. Plotnichenko. – Moscow : Mir, 1992. – 272 p.

2. D. Salimgareev, A. Yuzhakova, A. Lvov [et al.] Optical materials Materials Science, Physics. – 2022. – №131 (1).

LUMINESCENT HYBRID MATERIALS IN LEAD FLUORIDE SYSTEM WITH ON ZINC 8-OXYQUINOLATE OBTAINED BY CO-PRECIPITATION METHOD

P.V. Strekalov, E.V. Myagkova, K.I. Runina, O.B. Petrova
*D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology of Russia,
Moscow*

E-mail: strekalov_pavel@mail.ru

Hybrid materials (HMs) are promising as they are able to combine different properties of organic and inorganic components to create materials with unique functional properties. In our previous work, we have successfully synthesised hybrid materials based on PbF_2 -containing matrices by co-precipitation [1] using lithium 8-oxyquinolate (Liq). These materials exhibited high luminescence efficiency coupled with a short wavelength spectrum, indicating their potential for future applications.

In the preparation of lead fluoride-based hybrid materials, the initial aqueous solution of lead nitrate and a solution of zinc bis-(8-oxyquinolate) Znq_2 in ethanol were mixed in the first step of the synthesis. The concentration of the lead nitrate solution $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ was $C_{m1} = 1.43 \text{ M}$ and $C_{m2} = 0.8 \text{ M}$. In the second step of the synthesis, the precipitation of the final product was carried out using an aqueous solution of ammonium fluoride as the fluorinating agent. The co-precipitation resulted in powders with a crystal structure corresponding to $\alpha\text{-PbF}_2$ and small inclusions (not more than 2% by volume) of $\beta\text{-PbF}_2$, irrespective of the synthesis conditions.

Comparison of the normalised photoluminescence (PL) spectra of the GM and the original Znq_2 powder preparation showed that the broad band (400-700 nm) of the luminescence was significantly shifted towards shorter wavelengths ($\lambda_{\text{max}}=485\text{-}490 \text{ nm}$) compared to the original Znq_2 ($\lambda_{\text{max}}=505 \text{ nm}$), and an even shorter wavelength component ($\lambda_{\text{max}}=420\text{-}440 \text{ nm}$) appeared after reverse coprecipitation. The optical centres with $\lambda_{\text{max}}=485\text{-}490 \text{ nm}$ can be related both to the capture of Znq_2 molecules in different polymorphic modifications and to the exchange reaction to form Pbq_2 or $[\text{PbqF}]_2$, which have a maximum at 500 nm. And for the short wavelength component with $\lambda_{\text{max}}=420\text{-}440 \text{ nm}$, the introduction of electron acceptor groups such as fluorine into the benzene ring of oxyquinoline can be assumed, which can lead to a blue shift of the luminescence wavelength of the resulting hybrid materials [2].

1. P.V. Strekalov, M.N. Mayakova, K.I. Runina, O.B. Petrova, Non-Ferrous Metals, No. **10**, 25-31 (2021).

2. Y.-W. Shi, M.-M. Shi, J.-C. Huang, et al., Chemical Communications, No. **18**, 1941-1943, (2006)

EFFECT OF NANO- AND FEMTOSECOND IRRADIATION ON THE LUMINESCENCE OF CSPBI₃ PEROVSKITE NANOCRYSTALS IN BOROGERMANATE GLASS

A.N. Babkina, A.L. Losin, R.D. Kharisova, K.S. Zyryanova, V.A. Aseev, A.D. Dolgopolov, M.M. Sergeev
ITMO University, St. Petersburg
E-mail: babkina.anastasya@bk.ru

The work demonstrates laser-induced nucleation of CsPbI₃ perovskite nanocrystals in a borogermanate glass matrix. The initial glass matrix had the following composition: 6.67 ZnO-5.81 Na₂O-31.3 B₂O₃-50.53 GeO₂ mol. %. For the subsequent nucleation of CsPbI₃ perovskite nanocrystals, CsCO₃, PbO and KI were added to the glass batch. The source of femtosecond radiation was ANTAUS femtosecond laser (AVESTA, operating wavelength of 1030 nm, pulse duration of 224 fs, pulse repetition rate of 50 kHz, pulse energy 2.57 μ J, the pulse quantity in the irradiated region from 500 to 500 000). The nanosecond irradiation was made by LQ 529B pulsed Nd:YAG laser (532.8 nm, 10 ns pulse, 10 Hz, 190 mJ) (Solar Laser Systems). The initial glass did not provide luminescence, but after exposure to laser irradiation, luminescence in the red region was recorded. Fig. 1 shows the luminescence spectra obtained after laser exposure of femtosecond (a) and nanosecond (b) duration. It has been shown [1, 2] that perovskite crystals precipitated only during the femtosecond laser exposure and the subsequent heat treatment. During laser irradiation, perovskite crystals with many defects were formed in the glass matrix, which led to nonradiative transfer of excitation and hence luminescence quenching. In our case, luminescence of perovskite CsPbI₃ nanocrystals was observed immediately after laser exposure, which is more promising for repeated recording and storage of information in glass using principles of local crystallization.

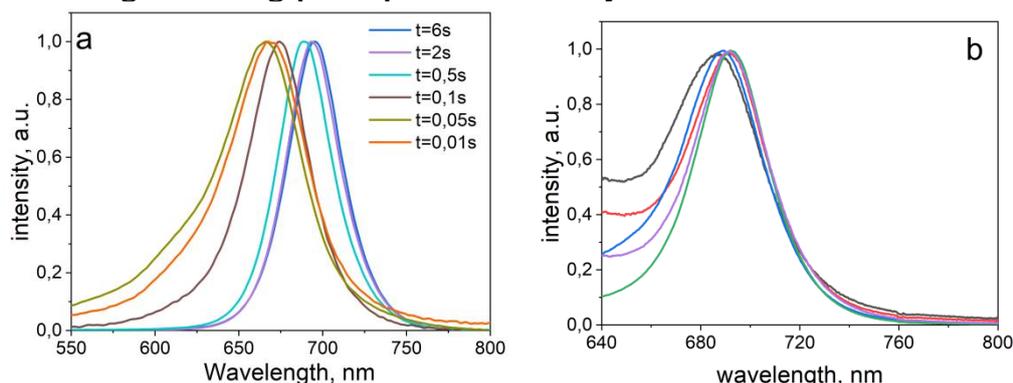


Fig. 1. Luminescence spectra of CsPbI₃ nanocrystals in borogermanate glass obtained after fs laser exposure with different duration at $E_p = 2.57 \mu$ J (a), and after ns laser (b).

The synthesis of the materials under study was funded by Russian Science Foundation (№ 24-72-10103).

1. K. Sun, D. Tan, X. Fang, и др., *Science*. **375**, 310 (2022).
2. Y. Teng, J. Zhou, G. Lin, и др., *Int. J. Optomech.* **6**(2), 179 (2012).

STUDY OF NITROGEN AND BISMUTH INFLUENCE
ON THE PROPERTIES OF DILUTE MAGNETIC SEMICONDUCTOR
GaMnAs

D.A. Zdoroveyshchev, Yu.A. Danilov, E.I. Malyshev
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod
E-mail: danielzdroveishev@yandex.ru

Currently, a search is underway for ways to modify the properties of gallium arsenide, which could expand the range of its applications in the field of nanoelectronics. One such method may be doping with impurities isovalent to arsenic, for example, bismuth or nitrogen. The introduction of bismuth or nitrogen into GaAs leads to a significant change in its properties. Thus, a decrease in the band gap has been reported with the introduction of small concentrations of bismuth [1]. A similar phenomenon is observed with the introduction of nitrogen [2]. It is also known about the influence of these isovalent impurities on the properties of the dilute magnetic semiconductor GaMnAs, one of the promising materials for semiconductor spintronics [3–4].

In this work, the structures under study were obtained using two methods: pulsed laser deposition (PLD) in a vacuum for forming GaMnAs structures, as well as GaMnAs:Bi. GaMnAs:N samples were obtained by a combined method consisting of PLD followed by nitrogen ion implantation with ion energy of 10 keV and varying irradiation doses. To anneal defects and electrically activate manganese, the structures were subjected to pulsed laser annealing (PLA) using a KrF excimer laser pulse with a variable energy density per pulse. For these structures, the magnetic field dependences of the Hall effect and magnetoresistance were studied in the temperature range of 7–300 K.

The work shows that GaMnAs:Bi and GaMnAs:N compounds are ferromagnetic, and for these structures the Curie temperature decreases somewhat compared to the initial GaMnAs layers. The introduction of bismuth leads to a change in the magnetic anisotropy in GaMnAs, the coercive field and magnetoresistance increase, which is consistent with the data [3]. For GaMnAs:N layers, a similar increase in the coercive field is observed, which may be due to the presence of residual defects after ion implantation, as well as an excess nitrogen concentration, similar to that described in [4].

The research was carried out within the state assignment (project FSWR-2023-0037).

1. A.R. Mohmad et al. *Phys. Status Solidi B* **251**(6), 1276(2014).
2. L. Bellaiche, S.-H. Wei, A. Zunger, *Appl. Phys. Lett.* **70**(26), 3558 (1997).
3. T. Andrearczyk et al., *Materials*. **13**(23), 5507(2020).
4. T. Manago, H. Akinaga, *Jap. J. of Appl. Phys.* **47**(8), 6297 (2008).

CHEMICAL COMPOSITION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF SiFe-BASED SYSTEMS

A.S. Shkapina, R.N. Kriukov, Yu.A. Dudin, M.V. Dorokhin, S.Yu. Zubkov,
A.V. Zdroveyshev

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod
E-mail: alenashkapina@yandex.ru

A developing area of modern science is the research and development of thermoelectric thermal energy converters. At present, scientists are searching for materials that could improve the efficiency of these devices. The efficiency of thermoelectric devices can be increased by using materials with a multiphase structure, as well as by taking into account the effects of non-stoichiometry on their performance characteristics [1]. Transition metal silicides are one possible solution to these problems.

The studied samples of iron silicide were obtained by ion implantation on the RADUGA-3M complex, using an accelerating voltage of 80 kV and a final dose of $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Next, a series of samples were subjected to rapid thermal annealing (RTA) at a temperature of 1000°C for a duration ranging from 15 seconds to 900 seconds. To study the chemical composition and effectiveness of Si-Fe bonding, we used X-ray photoelectron spectroscopy. Additionally, we used the 3ω technique to determine the thermal conductivity of the structures, which affects the efficiency of the resulting systems.

Using depth profiling of the structures directly in the spectrometer, we recorded the diffusion of iron deep into the sample. With an increase in the annealing duration, the number of Fe atoms included in the Fe-Si chemical bond decreased, which is probably due to the recrystallization of the silicon matrix. These results allow us to estimate the optimal annealing duration for the formation of structures with the largest number of Si-Fe bonds, which was 60 seconds. As the duration of RTA increases, the thermal conductivity decreases, which may be due to the formation of metal-silicide complexes that block the phonon modes that transmit heat [2]. This fact can be used to improve the quality of the structures inversely proportional to the thermal conductivity.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment FSWR-2023-0052).

1. Yu Jian et al., *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **31**, 2139 (2020).

2. D.M. Rowe, *Thermoelectrics Handbook. Macro to Nano.* – NY: CRC Press, 2006.

SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF THE Nd-CONTAINING OXYFLUORIDE GLASSES

V.V. Kouhar^{1,2}, M.Z. Zijatdinova³, L.S. Plekhava²

¹*B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk*

²*Belarusian State University, Minsk*

³*D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology of Russia, Moscow*

E-mail: v.kouhar@ifanbel.bas-net.by

Glasses activated by rare-earth ions are widely used in laser technology, integrated and fiber optics [1]. However, one of the sources of luminescence quenching for such ions in oxide matrices is hydroxyl groups (OH⁻). It was shown [2] that barbotage of their melt by dry oxygen is sufficient to reduce the concentration of these groups in the entire sample volume of yttrium-aluminum-borate glasses. This treatment has no influence on the efficiency of intracenter luminescence quenching, since it does not lead to changes in the ligand structure. In addition, huntite-like glasses are characterized by the record large minimum possible distance between Ln–Ln ≈ 0.67 nm [3], and, therefore, have the reduced cross-relaxation efficiency. The aim of this work is to develop new Nd-containing oxyfluoride yttrium-aluminum-borate glasses with a reduced content of the OH⁻–groups.

It has been shown that fluorination of yttrium-aluminum-borate glasses with composition close to the stoichiometry of huntite doped with neodymium leads to an increase in the specific absorption coefficient of the Nd³⁺ ions. For the glasses with the concentration of neodymium (III) oxide 0.1 mol. % (by synthesis) in the spectral region from 780 to 950 nm, the increase in integral luminescence intensity by 25–30 % was observed at all excitation wavelengths, whereas its decrease by 10–20 % occurred at the concentration of 5.0 mol. % (in comparison to the non-fluorinated samples). This enhancement of luminescence quenching of Nd³⁺ ions is the evidence of decrease in the minimum distance between the activator ions in the synthesized glass. It is interesting that at a low concentration of neodymium, the broad luminescence band the maximum at ~ 450 nm was registered, as a rule, appears only in crystals.

The mode and conditions of additional heat treatment of Nd-containing oxyfluoride yttrium-aluminum-borate glasses have been selected, which makes it possible to reduce absorption in the region of fundamental vibrations of OH⁻–groups by a factor of 3, as well as to increase the luminescence intensity in the bands ${}^2H_{9/2}+{}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ and ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ of Nd³⁺ ions.

1. C.N. Santos et al., J. Appl. Phys., **106**, 023512-1–6 (2009).
2. G.E. Malashkevich et al., Opt. Mat, **76**, 253–259 (2018).
3. G.E. Malashkevich et al., Mat. Chem. and Phys., **137**, 48–54 (2012).

DETERMINATION OF THE MICROHARDNESS NUMBER OF OPTICAL MATERIALS OF THE AGCL-KRS-5 SYSTEM

E.Y. Kabykina, P.V. Pestereva, L.V. Zhukova
*Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg
E-mail: e.iu.kabykina@urfu.ru*

The determination of microhardness is one of the main steps in measuring the mechanical properties of new materials. This work presents the results of a study of infrared materials based on silver and thallium halides of the AgCl-TlBr_{0.46}I_{0.54} system. Optical materials based on silver and thallium halides have a wide transmission range, plasticity, non-hygroscopicity, as well as high photo- and radiation resistance [1]. They are used to produce lenses, windows, and light guides operating in the infrared range.

The Vickers method was used to study the microhardness of single crystals and optical ceramics of the AgCl-TlBr_{0.46}I_{0.54} system [2]. This measurement method is simple and versatile. The PMT-3M installation on which the study was conducted was calibrated by determining the hardness number of a table salt crystal (NaCl) in accordance with the reference data. The study was carried out on samples of single crystals of composition 80, 90, 95, 98 wt. % AgCl in TlBr_{0.46}I_{0.54} and optical ceramics 3, 6, 9 wt. % AgCl in TlBr_{0.46}I_{0.54}. The microhardness was measured by pressing a diamond pyramid with an angle at the top of 136 ° into the material under study under a load of 0.98 N with an exposure time of 15 s. The indentation depth of the indenter in determining the microhardness of the studied single crystals and ceramics is several micrometers at a load of 100 g, therefore, the hardness of the materials is measured in gs/mm².

As a result of the microhardness measurement, the dependence of the hardness number values on the composition was revealed. With an increase in the AgCl content, the hardness number decreases from 53.2 to 13.2 for compositions 3 and 98 wt. % AgCl in TlBr_{0.46}I_{0.54} correspondingly. The coefficient of variation (measurement error) for single crystals is up to 5%, and for optical ceramics up to 10%.

1. L. Zhukova, D. Shatunova, D. Salimgareev, A. Yuzhakova, A. Korsakov, P. Pestereva, *Journal of Crystal Growth*. **627**, 127528 (2024).
2. A. A. Teploukhov, *Measurement of microhardness of surface layers of materials: method. instructions*, Omsk: Publishing house of OmSTU, 2017.

MODELING AND MANUFACTURING OF SINGLE-LAYER FIBERS

P.V. Pestereva, D.D. Salimgareev, S.E. Barykina, L.V. Zhukova

Ural Federal University named after

the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg

E-mail: l.v.zhukova@urfu.ru

The development and manufacture of infrared fibers, as well as the study of their optical properties, is an urgent task of modern fiber optics and photonics due to a wide transmission range without absorption windows. For many years, the scientific laboratory of Fiber Technologies and Photonics has been developing optical materials based on silver halides and monovalent thallium with high functional properties, designed for IR spectroscopy, IR pyrometry, laser and medical technology, thermal imaging, as well as fiber optics and photonics. Currently, the laboratory has developed algorithms for modeling optical fibers and the extrusion process of single-layer optical fibers based on systems $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ and $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$. To achieve this goal, finite element modeling was used in COMSOL Multiphysics software using embedded interfaces. Modeling of fibers and the extrusion process allows you to select the optimal modes of manufacturing optical fibers, as well as calculate the thermophysical and mechanical parameters associated with the extrusion process [1].

Fiber materials $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ and $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ showed high energy levels (up to 3.45 kW/m^2) at low optical loss values (up to $0.09 \cdot 10^{-3} \text{ dB/m}$ for LP01 mode) Based on the results of modeling the extrusion process and the obtained technological modes, polycrystalline light guides of the composition 3 and 93 mol. % $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, 3, 6 and 9 mol. % $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ were manufactured. The study of the optical properties of the fibers showed that the spectral transmission of the samples depended on the composition. Fiber materials $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ are transparent from 3.0-4.0 to 15.0-25.0 microns, and the fibers of the system $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ are transparent from 3.5 to 28.0 microns, and the fibers of the system. In the fibers of the composition 93 mol. % $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ grain recrystallization was observed within a few hours after manufacture, which led to their destruction. The minimum optical losses were 0.2 dB/m (at wavelengths of 11.2 – 14.7 microns) for fibers based on solid solutions $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ and 0.8 dB/m (at wavelengths of 10.0 – 14.0 microns) in the case of fibers of the system $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$.

1. A. Yuzhakova, D. Salimgareev, A. Lvov, et al., *Optical Materials*. **131**, 112687 (2022).

STUDY OF CRYSTALLITE SIZES AND MICROSTRESSES IN SAMPLES
OF SOLID SOLUTIONS OF $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ and $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} -$
 $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ SYSTEMS

D.D. Salimgareev, A.A. Yuzhakova, A.E. Lvov, P.V. Pestereva,
F.M. Kucherenko, E.Y. Kabykina, L.V. Zhukova
*Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg
E-mail: d.d.salimgareev@urfu.ru*

The phase diagrams of the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ and $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} -$
 $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ systems are characterized by unlimited solubility in the liquid state
and limited solubility in the solid state. In each of the diagrams, two regions of
homogeneity are observed – boundary solid solutions based on $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$,
 $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ or $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$, as well as heterogeneous regions of two phases
based on boundary solid solutions and rhombic phases (Fm3m+R-3 and
Pm3m+R-3). In these areas, it is possible to obtain various polycrystalline
optics. Since these materials are transparent from the visible to the far infrared,
the size of the crystallites can significantly affect transmission. In this regard, it
was necessary to investigate the dependence of the crystallite sizes and
microstress on the composition. According to the data of X-ray phase analysis,
the values of crystallite sizes and micro-stresses in cubic phases were calculated.
For this purpose, the Scherrer equation and Williamson-Hall models [1] of the
UDM [2], USDM [3], UDEDM [4] types were used. X-rays were obtained at
Rigaku MiniFlex 600 installation, modes: anode – Cu; CuK α radiation with a
wavelength of 1,541862 Å; shooting range from 3° to 90°; pitch 0,02°; scanning
speed 10°/min. The X-ray images were processed using specialized software
Rigaku PDXL XRD analysis software with an error of measuring the parameters
of the crystal lattice $\pm 0,002$ Å. According to the calculations carried out, the
size of crystallites in cubic phases for both systems decreases when approaching
the eutectic point only according to the Scherrer model (from 80 to 17 nm),
according to other models no clear dependence is observed.

1. V. Mote, Y. Purushotham, B. Dole, J. of Theor. and Appl. Phys. **6**, 1 (2012).
2. V. Biju, N. Sugathan, V. Vrinda, et al., J. Mater. Sc. **1**, 43 (2008).
3. Z.A. Khorsand, W.H. Abdul Majid, M.E. Abrishami, R. Yousefi, Solid State Sci. **13** (2011).
4. H. Irfan, K.M. Racik, S. Anand, J. Asian Ceram. Soc. **6**, 1 (2018).

ZINC-TELLURITE GLASSES FOR FIBER-OPTIC APPLICATIONS IN THE IR RANGE

A.R. Sharafiev¹, V.V. Dorofeev^{1,2}, S.E. Motorin^{1,2}, A.V. Kim²,
S.V. Muravyev², M. Y. Koptev², V.V. Koltashev³

¹ *G.G. Devyatikh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,
Nizhny Novgorod*

¹ *A.V. Gaponov IAP RAS, Nizhny Novgorod*

³ *Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

E-mail: sharafiev@ihps-nnov.ru

Glasses used for the manufacture of optical fibers must be highly transparent in the target wavelength range, resistant to crystallization, have the ability to modify the refractive index, and activate rare earth ions in the required concentration. Some compositions of zinc-tellurite glasses are suitable for the near and middle IR ranges.

The synthesis of a series of glass compositions based on TeO₂-ZnO, with the addition of modifying components such as Al₂O₃, Na₂O and Bi₂O₃, was carried out inside a sealed quartz glass reactor in a flow of purified oxygen. Thermophysical properties, transmission spectra and spectral dependences of the refractive index were investigated.

Glasses of the TeO₂-ZnO-La₂O₃-Na₂O system have the greatest resistance to crystallization. According to DSC data, the thermal effects of crystallization and melting of crystals are absent in the best compositions, even at low heating rates of 5 and 2.5 K/min. The glass transition temperature is near 300 °C and, hence, the viscosity of the glasses practically does not depend on the concentration of ZnO within the range of 10-20 mol%.

The transmission level of thin-film glasses is greater than 20% in the range of 0.4 – 6.2 μm. Absorption bands of hydroxyl groups with maxima at 2.3, 3.3 and 4.5 μm are present in the spectra of non-dehydrated samples. Using the original dehydration method, samples with a record-low absorption of hydroxyl groups at levels 0.001-0.002 cm⁻¹ in a band at ~3.3 μm were obtained.

It has been shown that it is possible to effectively modify the refractive index by changing the concentration of zinc oxide.

The possibility of alloying developed matrix compositions with REE oxides in concentrations of up to several mol.% has been established. Optical fiber with a step refractive index profile, including fibers activated with erbium ions with optical loss of no more than 0.5 dB/m in the wavelength range of 1.7 to 2.7 μm, have been successfully produced.

Acknowledgments: The work is supported by the Center of Photonics, a Center of Excellence funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (075-15-2022-316).

THE PROCESSES OF NON-RADIATIVE ENERGY TRANSFER IN ZrO₂-Eu₂O₃ CRYSTALS

M.A. Borik¹, S.A. Bukarev², A.V. Kulebyakin¹, N.A. Larina²,
E.E. Lomonova¹, F.O. Milovich^{3,4}, V.A. Myzina¹, V. Pankratov⁴, A.A. Reu¹,
P.A. Ryabochkina², N.Yu. Tabachkova³, T.V. Volkova², A.M. Zyuzin²

¹*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

²*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk*

³*National University of Science and Technology (MISIS), Moscow*

⁴*Department of Materials Science, Moscow Polytechnic University, Moscow*

⁵*Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Riga, Latvia*

E-mail: bukarevsa@yandex.ru

Crystals doped with europium ions are characterized by luminescence bands in the visible region and are often used as efficient crystalline phosphors. The luminescent properties of such phosphors can be attributed by optical transitions between the energy levels of Eu²⁺ and Eu³⁺ ions.

In this paper, the results of the phase composition and spectral-luminescent characteristics of the concentration series of ZrO₂-xmol.%Eu₂O₃ crystals (where x = 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 27) are presented.

It has been found that ZrO₂-xmol.%Eu₂O₃ crystals (x = 4, 6) are characterized by a tetragonal structure. ZrO₂-8mol.%Eu₂O₃ crystals exhibit a mixture of cubic and tetragonal phases. ZrO₂-xmol.%Eu₂O₃ crystals (x = 10, 12, 15) have a cubic structure, while ZrO₂-27mol.%Eu₂O₃ crystals are biphasic, containing a cubic modification and a pyrochlore phase.

Using optical and EPR - spectroscopy methods, the presence of color centers and Eu²⁺ ions in the concentration series of ZrO₂-Eu₂O₃ crystals after growth has been identified.

It has been shown that in ZrO₂-xmol.%Eu₂O₃ crystals (x = 4-15), the dominant optical centers of Eu³⁺ ions are eight-coordinated by oxygen, with vacancies in the second and further coordination spheres. In ZrO₂-20mol.%Eu₂O₃ and ZrO₂-27mol.%Eu₂O₃ crystals, six-coordinated optical centers of Eu³⁺ ions have been identified.

Лазерная физика
и лазерные материалы

ФОРМИРОВАНИЕ В КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ ОПТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ Er^{3+} С УШИРЕННОЙ ПОЛОСОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$

Г.Е. Малашкевич¹, В.В. Ковгар¹, Н.В. Варапай¹, Н.Т. Khuyen², К.Н. Нищев³

¹*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск*

²*Institute of Materials Science of the VAST, Hanoi*

³*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

E-mail: g.malashkevich@ifanbel.bas-net.by

Ионы Er^{3+} в достаточно обезвоженных оксидных стёклах характеризуются близким к 100 % квантовым выходом люминесценции в полосе ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, приходящейся на область минимальных собственных оптических потерь кварцевого стекла. Это позволяет таким стёклам уже более 40 лет оставаться вне конкуренции на рынке активных материалов для усилителей в оптоволоконных линиях связи со световодами на основе кварцевого стекла. Однако перманентная необходимость увеличения числа спектральных каналов, используемых для передачи информации, требует расширения указанной полосы люминесценции ионов Er^{3+} .

К настоящему времени наиболее высокие значения полуширины ($\Delta\lambda$) полосы люминесценции ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ($\lambda \approx 1530$ нм) ионов Er^{3+} достигнуты для стекол на основе $\text{Sb}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ (76–91 нм) [1], $\text{PbO-ZnO-B}_2\text{O}_3$ (≈ 87 нм) [2] и $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-AlF}_3\text{-NaF-LaF}_3$ (≈ 82 нм) [3]. Однако данные стёкла значительно отличаются своими физико-химическими свойствами от кварцевого стекла, что препятствует сварке соответствующих активного и пассивного световодов с обеспечением низких вносимых потерь ($\approx 0,1$ Дб). В отличие от перечисленных стекол полуширина этой полосы в кварцевых стеклах составляет ≈ 25 нм в отсутствие дополнительных легирующих элементов и ≈ 38 нм при солегировании алюминием [4]. Поэтому задача увеличения $\Delta\lambda$ полосы ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} в кварцевых стеклах остаётся актуальной.

Недавно сообщалось, что для уширения рассматриваемой полосы перспективным является формирование сложных оптических центров, включающих в себя ионы эрбия, а также металла с высоким локальным полем и щелочного металла с низкой прочностью химической связи между ним и кислородом [5]. Основываясь на этой концепции, нами был синтезирован золь-гель методом ряд Er -содержащих кварцевых стекол, где в качестве металла, ионы которого обладают высоким локальным полем, использовались хром и никель, и исследованы их спектрально-люминесцентные свойства. Факторами, повлиявшими на выбор этих металлов, являлись малый ионный радиус при высоких степенях окисления и возможность их люминесценции в оксидных матрицах, что позволяет рассчитывать на сенсбилизацию ими люминесценции ионов Er^{3+} .

На рис. 1 приведены «квантовые» спектры люминесценции (вставка) и её возбуждения синтезированных кварцевых стекол системы

$\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-SiO}_2$. Видно, что спектр их ИК-люминесценции представляет собой обусловленную полиэдрами $[\text{CrO}_4]^{3-}$ широкую полосу с $\lambda_{\text{макс}} \approx 1400$ нм [6], на длинноволновое крыло которой накладывается полоса ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} (см. кривые 3–5). При этом положение и форма полос возбуждения люминесценции, регистрируемой на длинах волн $\lambda_{\text{рег}} = 1530$ и 1350 нм, существенно различаются (ср. кривые 1 и 2). В частности, $\lambda_{\text{макс}}$ длинноволновой полосы возбуждения, обусловленной ионами хрома, при регистрации в полосе люминесценции ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ оказывается сдвинутым в красную сторону приблизительно на 20 нм. Данный факт свидетельствует, что лишь часть ионов хрома сенсibiliзирует люминесценцию ионов Er^{3+} . Различие эффективной $\Delta\lambda$ полосы ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ последних (54 нм) с одноимённой величиной, полученной при длине волны возбуждения $\lambda_{\text{возб}} = 520$ нм, составляющей 46 нм (кривые 4 и 5), позволяет сделать вывод, что эта «сенсibiliзирующая» часть ионов хрома входит в Cr–Er-центры. Заметим, что действительные значения $\Delta\lambda$ будут выше, поскольку в эксперименте не учитывалась люминесценция с $\lambda \geq 1610$ нм из-за слабой чувствительности приёмника.

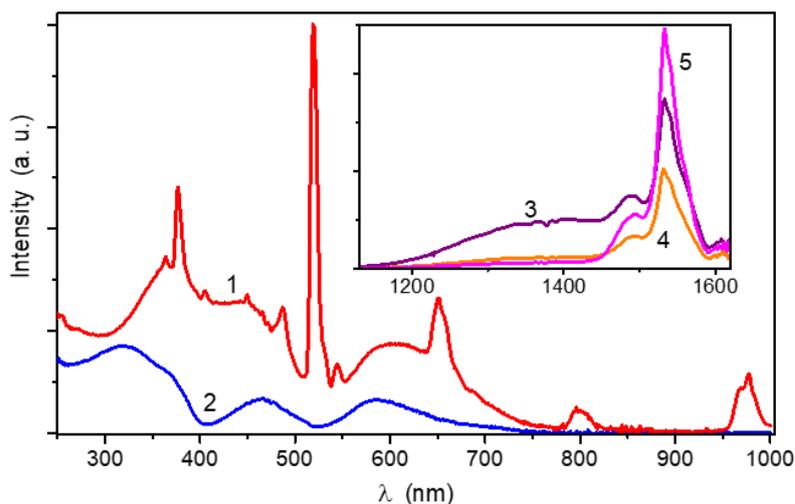


Рис. 1. Квантовые спектры люминесценции (вставка) и её возбуждения для кварцевого стекла, солегированного Er, Cr, Al и Li. $\lambda_{\text{возб}}$, нм: 380 (3), 420 (4), 520 (5); $\lambda_{\text{рег}}$, нм: 1530 (1), 1350 (2).

На рис. 2 изображены спектр поглощения, нормированные квантовые спектры люминесценции (вставка) и спектр возбуждения люминесценции стекол системы $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-NiO-MgO-Li}_2\text{O-SiO}_2$ и $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-NiO-MgO-Na}_2\text{O-SiO}_2$. Как видно, спектр поглощения первого стекла (кривая 1) представлен тремя широкими перекрывающимися полосами с $\lambda_{\text{макс}} \approx 430, 520$ и 600 нм. Отсутствие полосы при 520 нм в абсорбционном спектре как стекол с Ni^{2+} , так и с Ni^{3+} [7] позволяет связать её с ионами Ni^{4+} . Следует отметить, что при $\lambda_{\text{возб}} = 430$ нм это стекло демонстрирует слабую широкополосную ($\Delta\lambda \approx 150$ нм) люминесценцию с $\lambda_{\text{макс}} \approx 500$ нм. В ИК-области наблюдается лишь люминесценция ионов Er^{3+} (см. кривые 3, 4), причём замена Li на Na

в таком стекле сопровождается увеличением его эффективной $\Delta\lambda$ с 53 до 62 нм. Данный факт свидетельствует в пользу корректности используемой концепции, указанной в вводной части.

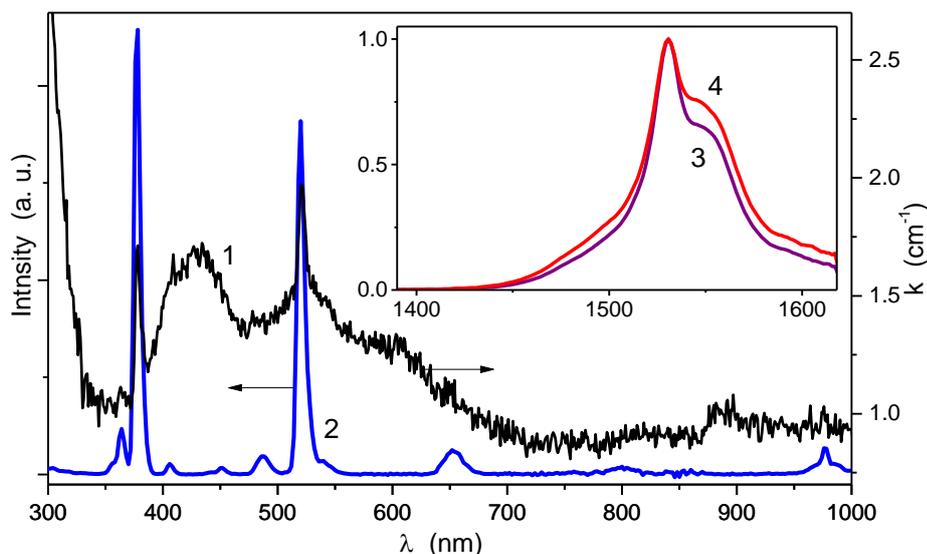


Рис. 2. Спектр поглощения (1), квантовые спектры люминесценции (3, 4) и её возбуждения (2) для кварцевых стекол, солегированных Er, Al, Ni, Mg, Li (1–3) и Er, Al, Ni, Mg, Na (4). $\lambda_{\text{возб}}$, нм: 520 (3, 4); $\lambda_{\text{рег}}$ = 1530 нм (2).

Здесь следует отметить, что в кварцевых стёклах системы $\text{Er}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3\text{--NiO--Li}_2\text{O--SiO}_2$ возможна произвольная реализация оптических центров Ni^{2+} , о чём свидетельствует появление присущей им полосы люминесценции с $\lambda_{\text{макс}} \approx 1400$ нм, соответствующей переходу ${}^3T_2({}^3F) \rightarrow {}^3A_2({}^3F)$ ионов Ni^{2+} [8] (см. рис. 3). Обращает на себя внимание также факт сенсбилизации этими ионами люминесценции ионов Er^{3+} , на что указывает отсутствие собственной полосы возбуждения последних при $\lambda = 320$ нм (см. рис. 2, кривая 2). Однако эффективность такой люминесценции в гомогенных стёклах является весьма низкой, поскольку при возбуждении в полосах поглощения Ni^{2+} в видимой и ИК областях спектра её зарегистрировать не удалось. Отметим, что значение эффективной $\Delta\lambda$ полосы сенсбилизированной люминесценции ионов Er^{3+} составляет ~ 55 нм. Это позволяет полагать отсутствие вхождения ионов Ni^{2+} , обладающих слабым локальным полем, в ближайшее окружение ионов Er^{3+} .

Таким образом, формирование в кварцевом стекле сложных оптических центров, включающих в себя ионы эрбия и металла с высоким локальным электрическим полем, а также щелочного металла с низкой прочностью химической связи между ним и кислородом позволяет реализовать эффективную полуширину полосы люминесценции ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} более 62 нм.

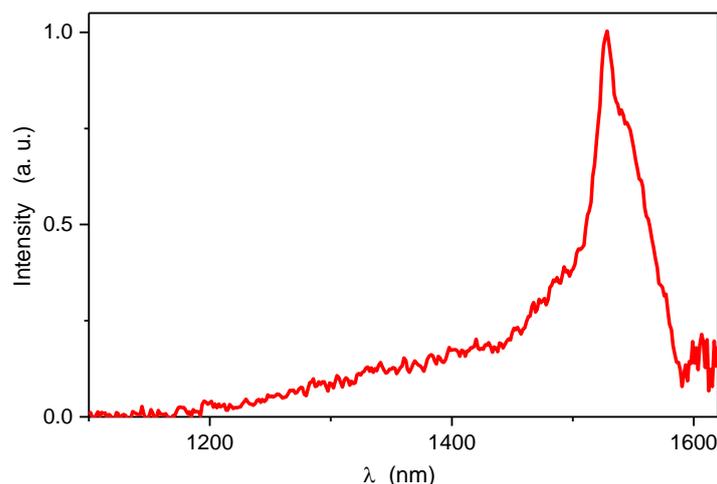


Рис. 3. Квантовый спектр люминесценции кварцевого стекла, солегированного Er, Al, Ga, Ni, Li. $\lambda_{\text{возб}} = 320$ нм.

Работа частично поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант №Ф23В-011) и научно-технической программой Союзного государства «Компонент-Ф» (мероприятие 3.1).

1. Q. Qian, Q.Y. Zhang, H.F. Jiang и др., *Physica B*. **405**, 2220 (2010).
2. A. Speghini, M. Peruffo, M. Casarin, et al., *J. Alloys Compds.* **300–301**, 174 (2000).
3. L. Wetenkamp, G.F. West, H. Tobben, *J. Non-Cryst. Solids*. **140**, 35 (1992).
4. I. Savelii, H. El Hamzaoui, L. Bigot, et al., *Laser Phys. Lett.* **13**, 025108 (2016).
5. Г. Е. Малашкевич, В. В. Ковгар, Н. В. Варапай и др., *ЖПС*. **90**, 684 (2023).
6. W. Streck, P.J. Deren, E. Lukowiak, et al., *J. Non-Cryst. Solids*. **288**, 56 (2001).
7. W.A. Abu-raia, D.A. Aloraini, S.A. El-Khateeb, Aly Saeed, *Scientific Reports*. **12**, 16024 (2022).
8. К.Н. Нищев, А.А. Панов, А.И. Заикин, *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. № 1 (29), 97 (2014).

КОМПАКТНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ С РЗЭ ИОНАМИ ВИДИМОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА

П.Г. Зверев

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

E-mail: zverev@lst.gpi.ru

Использование твердотельных лазеров на ионах редкоземельных элементов (РЗЭ) с накачкой полупроводниковыми лазерами дают возможность создавать эффективные компактные устройства, работающие на различных длинах волн в ближнем ИК спектральных диапазонах. Для видимого диапазона обычно используют нелинейное преобразование излучения путем генерации гармоник или параметрического преобразования, что сопряжено с необходимостью поддержания условий фазового синхронизма и стабилизации температуры. Поэтому большой интерес представляет создание лазеров на ионах РЗЭ, дающих когерентное излучение в видимой спектральной области.

Среди РЗЭ отметим ионы Pr^{3+} , Sm^{3+} , Dy^{3+} , Tb^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , в которых существуют метастабильные энергетические уровни, переход с которых даёт излучение в видимом спектре [1]. Для их возбуждения необходимо использовать излучение из синей и ультрафиолетовой областей спектра, которые могут попасть в полосу фундаментального поглощения матрицы. Для этих уровней часто наблюдаются низкие сечения поглощения и люминесценции, что ограничивает возможности создания эффективных видимых лазеров.

При использовании со-активированных кристаллов возбуждение можно реализовать за счет процессов ап-конверсии, то есть путем передачи энергии возбуждения от нескольких ионов-доноров на ион-акцептор с большей энергией возбуждения. Таким ионом-донором может выступать ион Yb^{3+} , в котором всего один возбужденный уровень $^5\text{F}_{5/2}$, с временем жизни порядка миллисекунд. Отсутствие высокоэнергетических уровней приводит к отсутствию поглощения из возбужденного состояния. Мощные полупроводниковые лазеры на основе GaAs с длиной волны генерации 940-980 нм широко используются для возбуждения иттербиевых активных сред.

В докладе рассмотрены вопросы создания лазеров на основе ионов Tb^{3+} , Pr^{3+} , Er^{3+} с возбуждением синими полупроводниковыми диодами, достигнутые мощности в различных режимах генерации, а также особенности работы лазеров при ап-конверсионном возбуждении ионами Yb^{3+} .

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда, грант № 23-29-00627.

1. H. Tanaka, S. Kalusniak, M. Badtke, et al., *Progress in Quantum Electron.* **84**, 100411, (2022).

2. N.K. Giri, S.B. Rai, A.Rai, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **74**, 1115 (2005).

СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОЛИВИНА NaYGeO_4 , ДОПИРОВАННОГО ИОНАМИ Tm^{3+} , Ho^{3+}

А.А. Меленцова, О.А. Липина, А.Ю. Чуфаров, А.А. Тютюнник,
В.Г. Зубков

Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: amelentsova@gmail.com

Оливины NaYGeO_4 допированные ионами Tm^{3+} , Ho^{3+} представляют интерес в качестве преобразователей излучения длины волны 808 нм в ИК диапазон порядка 1.6–2.1 мкм, а также лазерных сред. В настоящей работе представлены данные по синтезу и оптическим свойствам германатов $\text{NaY}_{1-x}\text{Tm}_x\text{GeO}_4$ ($x = 0.0–0.2$), $\text{NaY}_{0.85-x}\text{Tm}_{0.15}\text{Ho}_x\text{GeO}_4$ ($x = 0.0–0.055$).

Соединения получены цитратным методом, аттестованы методом РФА, кристаллизуются в орторомбической сингонии пр.гр $Pnma$, $Z = 4$. Эмиссионные спектры ($\lambda_{\text{ex}} = 808 \text{ nm}$) $\text{NaY}_{1-x}\text{Tm}_x\text{GeO}_4$ содержали две широкие полосы с максимумами при 1.475 и 1.9 мкм вызванные переходами ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ и ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$, соответственно. Из концентрационной зависимости люминесценции рассчитана постоянная мультипольного взаимодействия, которая свидетельствовала о протекании диполь-дипольного типа взаимодействия. На основании этого и скорости переноса энергии $W_{\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{3+}}$ показано, что оба перехода являются миграционно ускоренными. С увеличением x , $W_{\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{3+}}$ росла и достигала равновесия при $x = 0.15$. Наибольшей интенсивностью люминесценции обладал состав $\text{NaY}_{0.85}\text{Tm}_{0.15}\text{GeO}_4$ исходя из этого, были выбраны стехиометрические соотношения для содопирования ионами Ho^{3+} . Эмиссионные спектры $\text{NaY}_{0.85-x}\text{Tm}_{0.15}\text{Ho}_x\text{GeO}_4$ содержали широкую полосу в диапазоне 1.64 – 2.24 мкм (рис.1а) вызванную переходами ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ (Tm^{3+}), ${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{I}_8$ (Ho^{3+}) (рис.1б). С ростом концентрации Ho^{3+} происходило уменьшение вклада линии при 1.9 мкм и рост при 2.1 мкм до $x = 0.03–0.035$ после чего происходило концентрационное тушение. Возбуждение Ho^{3+} происходило в результате миграционно-ускоренной кросс-релаксации тулия (${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$) с последующей передачей энергии ${}^3\text{F}_4$ (Tm^{3+}) \rightarrow ${}^5\text{I}_8$ (Ho^{3+}). Скорость переноса энергии $W_{\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Ho}^{3+}}$ была рассчитана и уменьшалась по мере увеличения x .

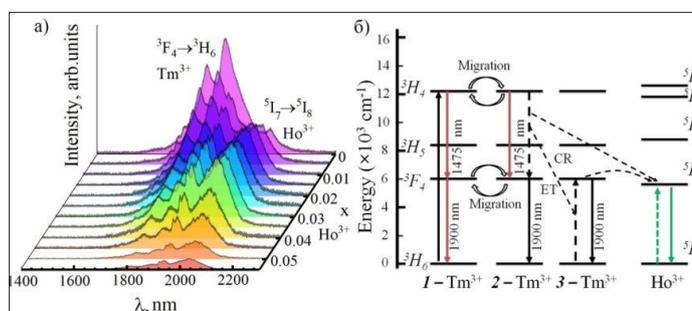


Рис. 1. а) Спектры люминесценции $\text{NaY}_{0.85-x}\text{Tm}_{0.15}\text{Ho}_x\text{GeO}_4$ ($x = 0.0–0.055$);
б) упрощенная диаграмма энергетических уровней, схема возбуждения
и инфракрасного излучения для ионов $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №23–73–10090), <https://rscf.ru/project/23-73-10090/>.

ЛАБОРАТОРНЫЙ МАКЕТ РАБОЧЕГО ЭТАЛОНА ПЕРВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ

В. В. Семашко^{1,2}, А. Д. Шишкин^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ

Казанский научный центр РАН, Казань

E-mail: ars.shishkin@gmail.com

Современные ультразвуковые дефектоскопы, использующие технологию генерации широкополосных ультразвуковых импульсов, позволяют осуществлять измерения скорости звука в различных материалах с точностью, превышающей точность, обозначенную в государственных стандартах. Целью настоящей работы является разработка лабораторного макета рабочего эталона первого разряда для измерения скорости продольных звуковых колебаний в твёрдых телах. В соответствии с ГОСТ Р 8.756-2014, создаваемый рабочий эталон должен позволять осуществлять измерения скорости звука в эталонном образце двумя различными методами, базирующимися на фундаментальных физических принципах.

Одной из фундаментальных характеристик твердого тела является показатель преломления n , который связан с волной давления - звуком. Показатель преломления может быть с точностью до 10^{-7} - 10^{-8} измерен интерференционными методами [1]. Используя технологию измерения скорости ультразвуковых колебаний в материалах по времени задержки отраженных сигналов от границы разделов различных сред и регистрируя время прохождения ультразвукового импульса между интерферирующими лазерными пучками, можно независимо определить искомый параметр.

Данный подход реализуется с помощью интерферометра Жамена и дефектоскопа УДЛ-2М. В качестве исследуемого образца используется стекло КС8. Импульсное излучение Nd:YAG лазера вызывает адиабатический скачок давления в приклеенном к образцу СЗС 22 (ультразвуковой импульс), который распространяется вглубь образца. Сигналы с интерферометра регистрировались фотоприемником с постоянной времени около 10 пс и наблюдались на осциллографе АКТАКОМ ADS-2221MV. Одновременно с помощью УДЛ-2М осуществлялось измерение скорости звука в образце время пролетным методом.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о возможности построения по предлагаемой схеме нового рабочего эталона первого разряда для скорости продольных звуковых колебаний в прозрачных твёрдых телах.

1. Е. И. Бутиков, *Оптика: Учебное пособие. 3-е изд., доп.*, СПб.: Издательство «Лань», 2012.

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ ЭРБИЯ И ИТТЕРБИЯ НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ

Ю.В. Жегучева¹, К.С. Серкина¹, И.В. Степанова¹, А.А. Елисеева¹,
М.Т. Метлин²

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Москва

²Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва
E-mail: stepanova.i.v@mict.ru

Висмутгерманатные стекла проявляют широкополосную люминесценцию в диапазоне 1000–1500 нм, что позволяет рассматривать их в качестве перспективных сред для оптического усиления [1]. Введение ионов Er^{3+} и Yb^{3+} в состав стекол способствует расширению спектрального диапазона ИК-люминесценции [2].

Целью настоящей работы было изучение влияния ионов эрбия и иттербия на спектрально-люминесцентные свойства висмутгерманатных стекол. В ходе работы синтезированы стекла мольного состава $10\text{Bi}_2\text{O}_3-90\text{GeO}_2$ и $10\text{Bi}_2\text{O}_3-85\text{GeO}_2-5\text{Na}_2\text{O}$, легированные 0,1 мол.% Er_2O_3 и 0,2 мол.% Yb_2O_3 , сверх 100%. Спектры возбуждения и люминесценции регистрировали с помощью спектрофлуориметра Jobin-Yvon Fluorolog QM-75-22-C при температуре 300 К с использованием ксеноновой дуговой лампы мощностью 450 Вт в качестве источника возбуждения.

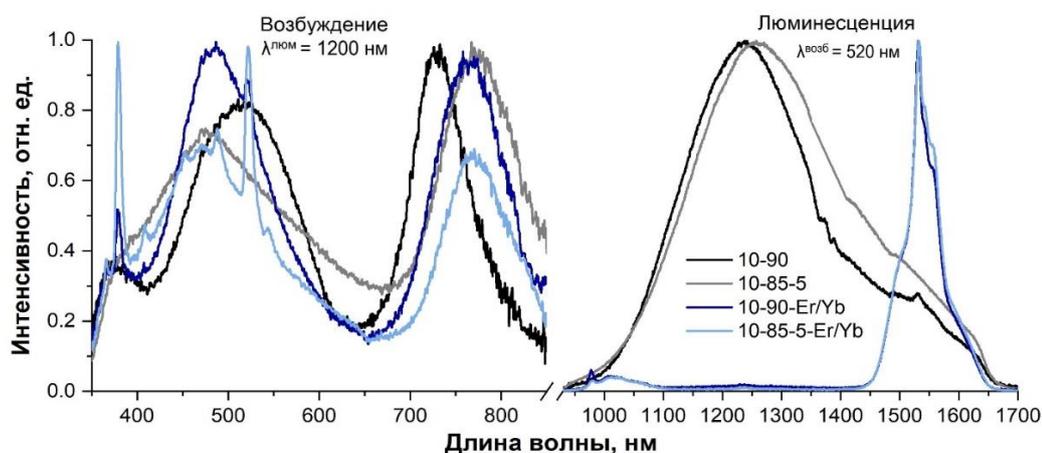


Рис. 1. Спектры возбуждения и люминесценции стекол.

Введение оксидов эрбия и иттербия способствует проявлению дополнительных полос возбуждения и люминесценции (рис. 1). Люминесценция эрбий-иттербиевых висмутгерманатных стекол в ИК-области представлена преимущественно переходами в ионах Yb^{3+} и Er^{3+} , тогда как в нелегированных образцах присутствует люминесценция висмутовых активных центров (ВАЦ). Также выявлено, что модифицирование оксидом натрия приводит к уширению полосы люминесценции ВАЦ и сдвигу полос возбуждения.

1. M. Peng et. al., J. Phys.: Condens. Matter, **21**, 285106 (2009).
2. G. Lakshminarayana et. al., J. Alloys Compd., **476** (1), 878-883 (2009).

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИКИ $Y_2O_3: Tm- Ho$

А.О. Арискин¹, Е.М. Бузаева¹, М.В. Герасимов¹, В.В. Осипов²,
Р.Н. Максимов², П.А. Рябочкина¹, В.А. Шитов²

¹*Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

²*Институт электрофизики УРО РАН, Екатеринбург
E-mail: alejandro.ariskin@yandex.ru*

Материалы на основе полуторных оксидов, легированных редкоземельными (РЗ) ионами, представляют значительный интерес для твердотельных лазеров с диодной накачкой [1,2]. Высокие значения пиковых сечений поглощения и вынужденного излучения, теплопроводности и механических характеристик позволяют рассматривать их в качестве активных сред твердотельных лазеров с высокими энергетическими характеристиками. Однако из-за высокой температуры плавления этих материалов (~ 2450 °С) получение их в виде монокристаллов является затруднительным. В соответствии с этим, интерес исследователей привлекает оптическая лазерная керамика на основе полуторных оксидов, легированных РЗ ионами.

В настоящей работе сообщается о получении лазерной керамики оксида иттрия, легированного ионами Tm^{3+} и солегированного ионами Ho^{3+} .

Интерес к данной керамике обусловлен возможностью осуществления накачки с использованием полупроводниковых лазерных линеек и матриц с длиной волны излучения ~ 800 нм на уровень 3H_4 ионов Tm^{3+} . В результате взаимодействия ионов Tm^{3+} посредством процесса кроссрелаксации ($^3H_4 \rightarrow ^3F_4$, $^3H_6 \rightarrow ^3F_4$) заселяется уровень 3F_4 ионов Tm^{3+} . С уровня 3F_4 ионов Tm^{3+} осуществляется безызлучательный перенос энергии на уровень 5I_7 ионов Ho^{3+} , который является верхним лазерным уровнем при получении лазерной генерации в области 2,1 мкм на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} .

В настоящей работе получены образцы концентрационного ряда керамик $Y_2O_3: Tm, Ho$ ($C_{Tm}=3$ ат.%, $C_{Ho}=1, 3, 6$ ат.%). Методом оптической микроскопии выявлено, что оптические дефекты в виде пор в основном сосредоточены в приповерхностных областях образцов керамик.

Выполнены исследования спектрально-люминесцентных характеристик керамик $Y_2O_3: Tm, Ho$ ($C_{Tm}=3$ ат.%, $C_{Ho}=1, 3, 6$ ат.%), в результате которых выявлено наличие безызлучательного переноса с уровня 3F_4 ионов Tm^{3+} на уровень 5I_7 ионов Ho^{3+} .

1. E. Mix, L. Fornasiero, V. Peters, et al., New Oxide Crystals for Solid State Lasers Cryst. Res. Technol. **34**, 255–260 (1999).

2. K. Petermann, G. Huber, L. Fornasiero, et al., Journal of Luminescence. **87**, 973-975(2000).

ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ НАНОСТРУКТУР В КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

В. С. Царев¹, А. Е. Левченко¹, Ю. В. Михайлов², А. С. Липатьев²,
А. Г. Охримчук

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

²*Российский химико-технологический университет им. Д. М. Менделеева,
Москва*

E-mail: vts@fo.gpi.ru

Оптическая память на основе кварцевого стекла имеет преимущество перед аналогами, за счет долговечности и большого объема. Однако, имеет и ряд недостатков. Элементарный носитель информации, называемым вокселом, имеет больший размер, чем у магнитных носителей и более низкую скорость записи. Данный недостаток компенсируется за счет подключения третьей координаты. Помимо этого, было предложено использование субмикронных двулучепреломляющих структур, формируемых за счет воздействия на одну и ту область стекла микронного размера последовательности фемтосекундных линейно-поляризованных лазерных импульсов. Это позволило добавить еще одно измерение для кодирования информации – двулучепреломление – и увеличить плотность записи. На данный момент максимальная скорость записи двулучепреломляющих вокселов составляет 225 Кбит/с, полученная в лаборатории П. Г. Казанского [1].

В вышеупомянутом методе, применяется модуляция энергии фемтосекундных лазерных импульсов с линейной поляризацией, поворотом которой кодируется азимут медленной оси двулучепреломления. Такой метод получил название модуляции энергии импульса (МЭИ), в котором общее число импульсов составляет 8 импульсов, расстояние между которыми не менее 70 нс. Мы предлагаем новый способ формирования двулучепреломляющих вокселов путем фокусирования спадающей субнаносекундной гребенки фемтосекундных лазерных импульсов. Гребенка состоит из двух частей: из первого импульса, характерная энергия которого составляет около 45 нДж, и экспоненциально спадающей гребенки, формируемой резонатором. Характерная энергия экспоненциального хвоста составляет 20% от энергии первого импульса. Оптимальное расстояние между импульсами в гребенке составляет 70 пс. Механизм записи субнаносекундной гребенкой раскрыт в работе [2]. Но в этой работе использовалась экспоненциально спадающая гребенка фемтосекундных импульсов. В настоящем исследовании за счет управления формой огибающей субнаносекундной гребенки нам удалось уменьшить суммарную энергию гребенки. Таким образом новая субнаносекундная гребенка фемтосекундных лазерных импульсов позволяет увеличить скорость формирования двулучепреломляющих вокселов вплоть до 2 Гбит/с.

1. Y. Lei, et al., *Optica* **8**, 1365-1371 (2021).

2. A. Okhrimchuk, et al. *Sci Rep* **7**, 16563 (2017).

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛЕ $Y_3Al_5O_{12}:Er$ С ЛАЗЕРНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАКАЧКОЙ

А.М. Жамков, А.О. Арискин, П.А. Рябочкина

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

E-mail: ryabochkina@mail.ru

Лазеры, генерирующие излучение в области 1,5 мкм, широко используются в различных практических применениях: телекоммуникациях, лидарных установках, медицине и т.д.

Лазерная генерация в области 1,5 мкм получена на кристаллах и стеклах, легированных ионами Er^{3+} , при их солегировании ионами Yb^{3+} [1]. В таких активных средах лазерная генерация в области 1,5 мкм осуществляется на переходе $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} , при этом накачка осуществляется на уровень $^2F_{5/2}$ ионов Yb^{3+} , а населенность верхнего лазерного уровня $^4I_{13/2}$ происходит за счет безызлучательного переноса энергии от ионов Yb^{3+} к ионам Er^{3+} .

В настоящее время имеется альтернативный способ получения лазерной генерации в области 1,5 мкм на переходе $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} при резонансной накачке на уровень $^4I_{13/2}$ [2].

В настоящей работе выполнено моделирование работы лазера на кристалле иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами Er^{3+} , генерирующего излучение в области 1,5 мкм на переходе $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} в непрерывном режиме и режиме модулированной добротности с использованием акустооптического затвора. Выполнен сравнительный анализ результатов моделирования с экспериментом.

1. Д. А. Бондаренко, В. Е. Карасик, Л. Н. Магдич и др., Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 5, 30 (2017).

2. К. Н. Горбаченя, С. В. Курильчик, В. Э. Кисель и др., Квантовая электроника. 46, 6 (2016).

СВОЙСТВА СТЕКОЛ СЕРИИ $\text{TeO}_2\text{-ZnO-La}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-Er}_2\text{O}_3$
С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ОКСИДА ЭРБИЯ

А.Р. Шарафеев¹, В.В. Дорофеев^{1,2}, С.Е. Моторин^{1,2}, А.К. Ким²,
С.В. Муравьев², М.Ю. Коптев², В.В. Колташев³

¹*Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятовых РАН,
Нижний Новгород*

²*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород*

³*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
E-mail: sharafeev@ihps-nnov.ru*

Интерес к теллуридным стеклам, в том числе активированным ионами РЗЭ в качестве материалов активных сред волоконных лазеров обусловлен широкой областью стеклообразования матричных составов и высокой растворимостью редкоземельных оксидов в них, хорошей химической и кристаллизационной устойчивостью, ярко выраженными оптическими нелинейными параметрами, широкой областью прозрачности от видимой до средней ИК [1–3].

Для синтеза стёкол на основе TeO_2 серии $\text{TeO}_2\text{-ZnO-La}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-xEr}_2\text{O}_3$ (TZLNEr), $x = 0\text{-}4$ мол.% применялась оригинальная методика удаления гидроксильных групп из стеклообразующего расплава.

Температуры стеклования для всех исследованных составов близки к $300\text{ }^\circ\text{C}$; стёкла, содержащие менее 2,3 мол.% Er_2O_3 , чрезвычайно устойчивы к кристаллизации при скорости нагрева 5 град., на термограммах отсутствуют тепловые эффекты кристаллизации и плавления.

Область прозрачности тонких образцов от $\sim 0,4$ до ~ 6 мкм, для наиболее обезвоженных стекол характеристические полосы поглощения ОН-групп с максимумами $\sim 2,3$; 3,3 и 4,4 мкм не выделяются. Повышение концентрации Er_2O_3 не приводит к заметному изменению границ области пропускания, но происходит увеличение интенсивности поглощения в характеристических полосах иона Er^{3+} .

При возбуждении на 975 нм были исследованы полосы люминесценции Er^{3+} вблизи 1,55 и 2,75 мкм, соответствующие электронным переходам ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ и ${}^4\text{I}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$. Интенсивность и время затухания люминесценции возрастают с концентрацией оксида эрбия и с уменьшением содержания гидроксильных групп.

В волоконных световодах с активированными ионами эрбия сердцевинами была экспериментально продемонстрирована лазерная генерация на длине волны $\sim 2,7$ мкм [2].

Благодарности: Исследование выполнено в рамках реализации Программы НЦМУ «Центр фотоники» при финансовой поддержке Минобрнауки, соглашение № 075-15-2022-316.

1. S. V. Muravyev, et al., Sci. Rep. **8**, 16164 (2018).
2. S. V. Muraviev, et al., IEEE Photonics Technol. Lett., V. **35**, n. 24, pp. 1435-1438, 2023.
3. V.V. Dorofeev et al., J. Non-Cryst. Solids **357**, 2366–2370 (2011).

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ EDTA НА ПАРАМЕТРЫ РОСТА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА KDP

С.А. Вильченко, Грибко В.В.

*Институт прикладной физики имени А. В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород*

E-mail: sergey.vilchenko@yandex.ru

Кристаллы дигидрофосфата калия (KDP) активно применяются для изготовления оптических элементов лазерных систем. Так, для увеличения скорости роста граней тетрагональной призмы и бипирамиды кристалла KDP, а также для уменьшения влияния ионов трехвалентных металлов на процесс роста, можно использовать различные комплексоны. Одним из таких химических соединений является этилендиаминтетрауксусная кислота (EDTA).

Для изучения влияния EDTA на рост кристаллов KDP и их морфологию был выбран ряд концентраций в ростовом растворе: 0.001, 0.005, 0.015, 0.02, 0.035, 0.05 мол. %. Из полученных данных следует, что добавление EDTA приводит к уменьшению мертвой зоны и увеличению скорости роста граней призмы в зависимости от пересыщения.

Так же были получены спектры пропускания выращенных кристаллов, добавление EDTA в ростовой раствор привело к увеличению величины пропускания на диапазоне длин волн 250-1100 нм (рис. 1).

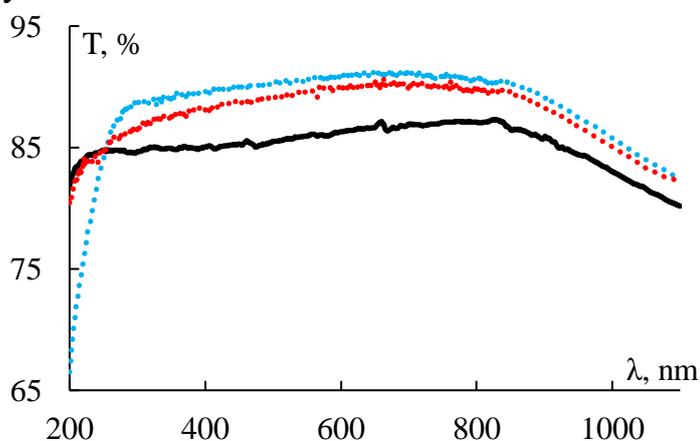


Рис.1. Спектры пропускания выращенного кристалла (черный – KDP без EDTA, синий – KDP с добавлением EDTA $C = 0.005$ мол%, красный – KDP с добавлением EDTA $C = 0.025$ мол%).

Исследование показало, что добавление EDTA в ростовой раствор приводит к увеличению скорости роста граней, не нарушая при этом кристаллической структуры. Влияние EDTA на параметры роста и свойства кристалла KDP показывают высокий потенциал для дальнейшего исследования концентрационного ряда EDTA в ростовых растворах KDP, а также использование данного комплексона в процессе скоростного выращивания монокристаллов группы KDP.

АЛМАЗНАЯ ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА КРИСТАЛЛОВ КРС-5

А.А. Пахомова, М.С. Кузнецов, К.С. Зараменских,

С.М. Пилюшко, А.Р. Романенко, М.В. Морозов

*Государственный научно-исследовательский и проектный институт
редкометаллической промышленности «Гиредмет», Москва*

E-mail: AAPahkhomova@rosatom.ru

Кристаллы КРС-5 (TiBr –Ti) обладают высокими значениями показателей, необходимых для функциональных оптических материалов, используемых для создания различных элементов (окон, линз, призм и т.д.). Равномерная прозрачность в ИК и видимой областях спектра (0,35–50 мкм), пропускание до 70 % при отсутствии полос поглощения, возможность достижения практически полного пропускания при нанесении просветляющего покрытия, механическая, вибрационная прочность, химическая и влагостойкость позволяют назвать данный оптический материал одним из наиболее перспективных [1–3].

Проблемы, препятствующие широкому применению кристаллов КРС-5, связаны с невозможностью использования традиционных способов обработки. Материал мягок, пластичен, обладает высоким коэффициентом термического расширения, низкой теплопроводностью, высокой анизотропией, поэтому после обработки образуется глубокий нарушенный слой кристаллической структуры. Подходящим методом является алмазная лезвийная обработка на ультрапрецизионных станках.

Предварительные эксперименты по обработке плоской поверхности заготовки из КРС-5 показали чередование зон хрупкого разрушения и зон без дефектов, что приводит к выводу о влиянии кристаллографической ориентации на качество поверхности. С учётом влияния положения заготовки КРС-5 на качество финального материала вместо токарной методики была реализована двухэтапная методика обработки кристаллов методом алмазного фрезерования.

В ходе первого этапа проводилось определение наилучшей ориентации заготовки, этап был реализован на ультрапрецизионном стенде. При обработке заготовка совершала вращательные движения вокруг своей оси. Траектория движения алмазного резца проходила через ось вращения заготовки.

По расположению зон хрупкого разрушения, образовавшихся при обработке, с учетом известной траектории резца были сделаны выводы об оптимальной ориентации заготовки, способной обеспечить пластичный съём материала без хрупкого разрушения.

Второй этап заключался в обработке правильно сориентированной детали. На данном этапе заготовка перемещалась относительно фрезерной головки с движением подачи без вращения. Оставшиеся после первого этапа следы хрупкого разрушения были полностью устранены путем обработки в новом режиме, с увеличенной частотой вращения инструментального шпинделя и большей глубиной резания. Далее

обработка выполнялась на чистовых режимах алмазным резцом с радиусом 5 мм. При этом полное устранение следов разрушения возможно при условии верного определения метода обработки и положения заготовки.

В результате работы получены кристаллы с шероховатостью поверхности, обычной для оптических изделий из КРС-5 – Ra 0,01 мкм.

Предложены способы повышения точности и качества обработки, такие как повышение жёсткости основных узлов станка, использование встроенных механизмов выставления узлов станка и контроль формы заготовки без снятия со станка.

Показано, что предлагаемый способ обработки кристаллов КРС-5 позволит повысить производительность изготовления оптических изделий с обеспечением необходимой точности и качества.

Авторы выражают благодарность коллективу НПО «Асферика» – Е.М. Захаревичу и В.В. Лапшину за участие в проведении теоретических и экспериментальных исследований.

1. Т. И. Дарвойд, Е. К. Карлова, Н. В. Карлов, Квантовая электроника. Т. 2, № 4. С. 765–772 (1975).

2. М. С. Кузнецов, К. С. Киселёва, И.С. Лисицкий, Цветные металлы. № 4. С. 81-84 (2011).

3. И.С. Лисицкий, М.С. Кузнецов, К.С. Зараменских и др., Цветные металлы. № 11, С. 67-71 (2012).

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ МОД В ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ С КОРОТКИМ РЕЗОНАТОРОМ

В.А. Камынин, А.И. Трикшев, А.В. Ширманкин, А.А. Рыбалтовский,
С.Е. Сверчков, Б.И. Денкер, В.Б. Цветков

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

E-mail: shirmankin123@gmail.com

Волоконные лазеры с узкой линией, генерирующие две ортогонально-поляризованные моды резонатора, представляют интерес в качестве прецизионных линейных датчиков температуры и деформаций [1]. Частота биений поляризационных мод находится в радиочастотном (РЧ) диапазоне, что даёт преимущества в виде простоты опроса, высокого соотношения сигнал/шум, абсолютного кодирования и возможности мультиплексирования нескольких датчиков.

В данной работе предметом исследования являлся волоконный лазер с коротким резонатором Фабри-Перо. В качестве активного элемента использовался композитный иттербиевый световод стандартного диаметра (125 мкм) с высоким содержанием (2,5 вес. %) ионов Yb^{3+} в сердцевине [2]. Резонатор был сформирован на отрезке световода длиной ~ 2 см двумя брэгговскими решетками с максимумом отражения на длине волны ~ 1069 нм. Для накачки использовалось излучение с длиной волны 976 нм. Спектральная «тепловая» карта излучения на выходе из лазера, полученная при различных значениях мощности накачки, представлена на рис. 1 а.

Лазер генерировал в непрерывном режиме, при этом наблюдались биения ортогонально-поляризованных мод на частоте 18.4 ГГц (рис. 1 б). Эта величина соответствовала эффективной длине резонатора в 5,5 мм. В зависимости от температуры резонатора частота биений изменялась в диапазоне от 18.403 до 18.415 ГГц (рис. 1 в).

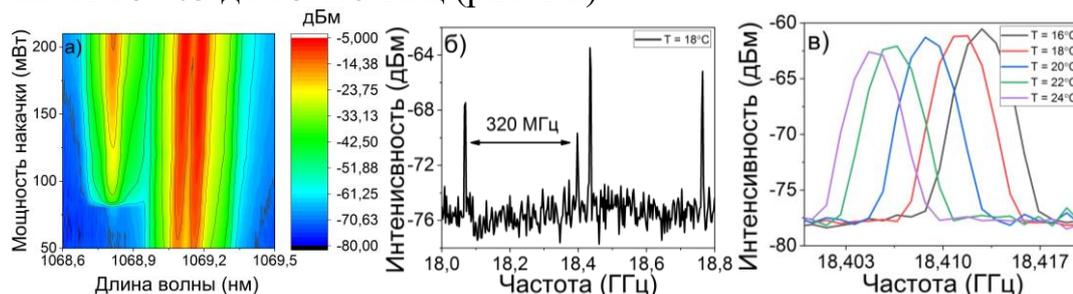


Рис. 1. а) Спектральная «тепловая» карта излучения при различной мощности накачки; б) РЧ спектр излучения; в) РЧ спектр излучения при различной температуре резонатора.

Также биения регистрировались и на более низкой частоте в 300 МГц. При изменении температуры и мощности накачки лазера частота этих биений изменялась в диапазоне от 230 до 330 МГц.

1. Y.-N. Tan et al. Opt. Express, vol. **19**, N 21, pp. 20650-20656, (2011).
2. M. Yu. Koptev et al. Photonics, vol. **9**, p. 760, (2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТА КОНИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО – КРИСТАЛЛ $BaF_2:Yb:Er$

А.В. Ширманкин, В.А. Камынин, С.В. Кузнецов, В.А. Конюшкин,
А.Н. Накладов, А.А. Александров, В.Б. Цветков
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
E-mail: andreishirmankin34@gmail.com

Кристаллы и волокна, легированные редкоземельными элементами (РЗЭ), составляют основу большинства современных лазерных систем. Данные активные среды имеют свои особенности и преимущества. Так кристаллы позволяют достичь высоких удельных коэффициентов усиления, а волокна обладают рядом технологических преимуществ (эффективное охлаждение, устойчивость к внешним воздействиям, совместимость с другими волоконными устройствами) [1,2]. Совмещение наилучших качеств различных типов активных сред является интересной и нетривиальной задачей, решение которой позволит достичь оптимальных результатов для качества генерируемого излучения.

В данной работе была изучена возможность ввода люминесценции кристалла $BaF_2:Yb:Er$ в коническое оптическое волокно. Для этого с помощью установки Vytran GPX 3400 было создано несколько образцов конических волокон (тейперов) с различной геометрией продольного профиля. Были созданы тейперы с длинами от 4 до 5 см и диаметрами перетяжки от 15 до 30 мкм (см. вставку на Рис. 1). Полученные тейперы помещались на кристалл $BaF_2:Yb:Er$ диаметром 10 мм, далее за счет прижима достигался оптический контакт между перетяжкой и поверхностью кристалла. Поперечная накачка кристалла осуществлялась многомодовым диодным лазером с длиной волны генерации 976 нм. Анализ люминесценции, введенной в коническое волокно, производился с помощью оптического спектр-анализатора. В результате была продемонстрирована возможность ввода люминесценции от кристаллов $BaF_2:Yb:Er$ в конические волокна (Рис. 1).

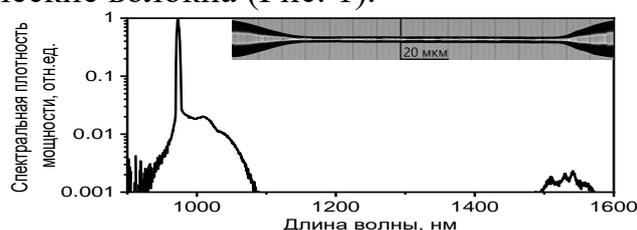


Рис. 1. Спектральная плотность мощности комплекса коническое волокно – кристалл $BaF_2:Yb:Er$ и профиль тейпера на вставке.

Показана возможность поперечного ввода излучения внешних источников в коническое волокно. В перспективе на данном комплексе коническое волокно – кристалл, легированный РЗЭ, можно создать оптические усилители или волоконные лазеры.

1. G. Huber, C. Krankel, K. Petermann, J. Opt. Soc. Am. B. **27**, B93 – B105 (2010).
2. S. Addanki, I. S. Amiri, P. Yupapin, Elsevier. **10**, 743 - 750 (2018).

Laser physics
and laser materials

FORMATION OF Er³⁺ OPTICAL CENTERS WITH WIDENED
LUMINESCENCE BAND ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ IN SILICA GLASS

G.E. Malashkevich¹, V.V. Kouhar¹, N.V. Varapay¹, H.T. Khuyen²,
K.N. Nishchev³

¹*B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk*

²*Institute of Materials Science of the VAST, Hanoi, Vietnam*

³*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk*

E-mail: g.malashkevich@ifanbel.bas-net.by

Er³⁺ ions in sufficiently dehydrated oxide glasses are characterized by close to 100% quantum yield of luminescence in the band ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, falling in the region of minimal intrinsic optical losses of silica glass. This allows such glasses for more than 40 years to remain out of competition in the market of active materials for amplifiers in fiber optic communication lines with light guides based on silica glass. However, the permanent need to increase the number of spectral channels used for information transmission requires the expansion of the specified luminescence band of Er³⁺ ions.

To date, the highest values of the half-width ($\Delta\lambda$) of the ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ($\lambda \approx 1530$ nm) luminescence band of Er³⁺ ions have been achieved for glasses based on Sb₂O₃–B₂O₃ (76–91 nm) [1], PbO–ZnO–B₂O₃ (≈ 87 nm) [2], and ZrF₄–BaF₂–AlF₃–NaF–LaF₃ (≈ 82 nm) [3]. However, these glasses differ significantly in their physical and chemical properties from silica glass, which prevents the welding of the corresponding active and passive light guides with low insertion loss (≈ 0.1 dB). In contrast to the above glasses, the half-width of this band in silica glasses is ≈ 25 nm in the absence of additional doping elements and ≈ 38 nm when co-doped with aluminum [4]. Therefore, the task of increasing $\Delta\lambda$ the ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ band of Er³⁺ ions in silica glasses remains relevant.

Recently, it has been reported that the formation of complex optical centers including ions of erbium as well as a metal with a high local field and an alkali metal with a low strength of chemical bonding between it and oxygen is promising for the broadening of the band under consideration [5]. Based on this concept, we synthesized by sol-gel method a series of Er-containing silica glasses, where chromium and nickel were used as metal ions with high local field, and investigated their spectral-luminescence properties. The factors that influenced the choice of these metals were their small ionic radius at high oxidation degrees and the possibility of their luminescence in oxide matrices, which allows us to count on their sensitization of Er³⁺ ions luminescence.

Fig. 1 shows the “quantum” spectra of luminescence (inset) and its excitation of synthesized silica glasses of the system Er₂O₃–Cr₂O₃–Al₂O₃–Li₂O–SiO₂. It can be seen that their IR luminescence spectrum is a broad band due to [CrO₄]³⁻ polyhedra with $\lambda_{\max} \approx 1400$ nm [6], the long-wavelength wing of which is overlapped by the ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ band of Er³⁺ ions (see curves 3–5). At the same time, the position and shape of the excitation bands of

luminescence recorded at wavelengths $\lambda_{\text{rec}} = 1530$ and 1350 nm differ significantly (cf. curves 1 and 2). In particular, λ_{max} the long-wavelength excitation band due to chromium ions is shifted to the red side by about 20 nm when recorded in the luminescence band ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$. This fact indicates that only a part of chromium ions sensitizes the luminescence of Er^{3+} ions. The difference of the effective $\Delta\lambda$ band ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ of the latter (54 nm) with the same name value obtained at the excitation wavelength $\lambda_{\text{exc}} = 520$ nm, which is 46 nm (curves 4 and 5), allows us to conclude that this “sensitizing” part of chromium ions is included in Cr–Er centers. Note that the actual values of $\Delta\lambda$ will be higher, since the luminescence from $\lambda \geq 1610$ nm was not taken into account in the experiment due to the weak sensitivity of the receiver.

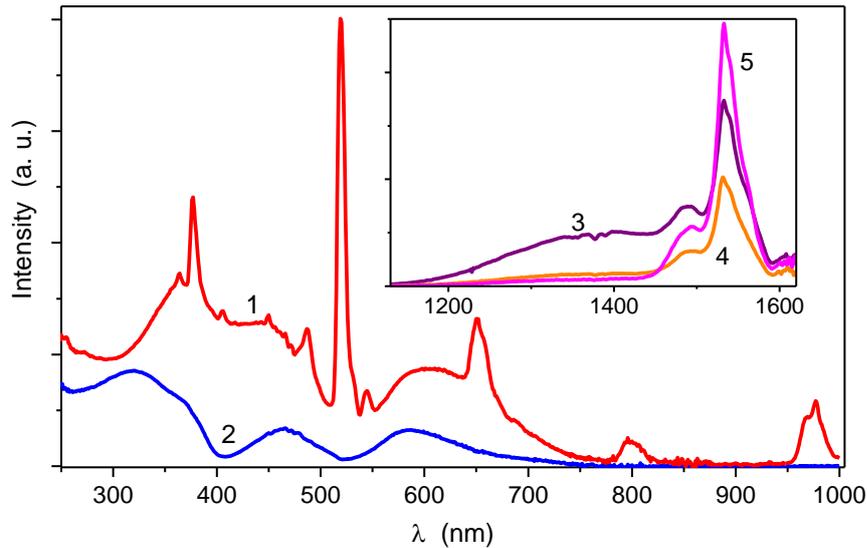


Fig. 1. Quantum spectra of luminescence (inset) and its excitation for silica glass co-doped with Er, Cr, Al and Li. λ_{exc} , nm: 380 (3), 420 (4), 520 (5); λ_{rec} , nm: 1530 (1), 1350 (2).

Fig. 2 shows the absorption spectrum, normalized luminescence quantum spectra (inset) and luminescence excitation spectrum of $\text{Er}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--NiO--MgO--Li}_2\text{O--SiO}_2$ and $\text{Er}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--NiO--MgO--Na}_2\text{O--SiO}_2$ system glasses. As can be seen, the absorption spectrum of the first glass (curve 1) is represented by three broad overlapping bands at $\lambda_{\text{max}} \approx 430, 520$ and 600 nm. The absence of the band at 520 nm in the absorption spectrum of both glasses with Ni^{2+} and Ni^{3+} [7] allows us to associate it with Ni^{4+} ions. It should be noted that at $\lambda_{\text{exc}} = 430$ nm, this glass exhibits weak broadband ($\Delta\lambda \approx 150$ nm) luminescence with $\lambda_{\text{max}} \approx 500$ nm. In the IR region, only luminescence of Er^{3+} ions is observed (see curves 3, 4), and the replacement of Li by Na in such glass is accompanied by an increase in its effective $\Delta\lambda$ from 53 to 62 nm. This fact testifies in favor of the correctness of the used concept indicated in the introductory part.

Here it should be noted that in silica glasses of the $\text{Er}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3\text{--NiO--Li}_2\text{O--SiO}_2$ system arbitrary realization of Ni^{2+} optical centers is possible, as evidenced by the appearance of inherent luminescence band with $\lambda_{\text{max}} \approx 1400$ nm, corresponding to the transition ${}^3T_2({}^3F) \rightarrow {}^3A_2({}^3F)$ of Ni^{2+} ions

[8] (see Fig. 3). The fact that these ions sensitize the luminescence of Er^{3+} ions is also

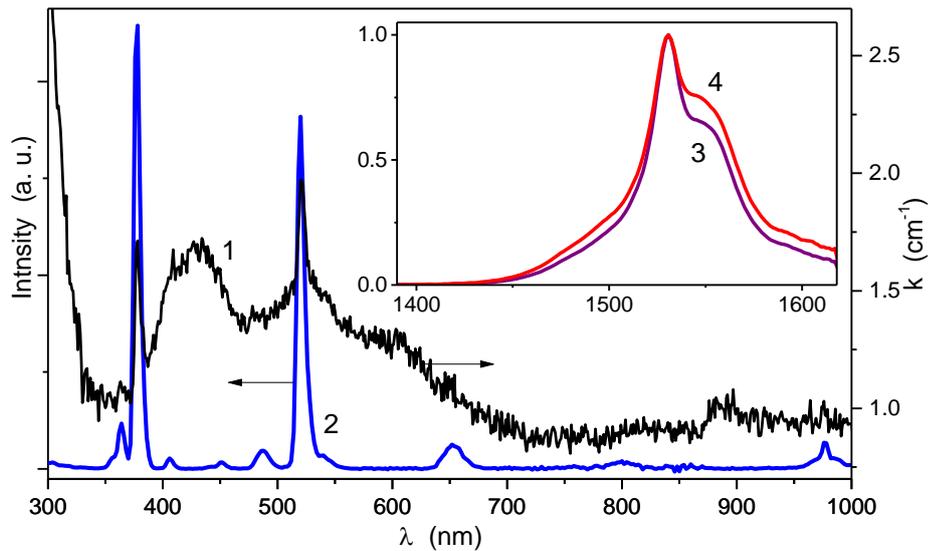


Fig. 2. Absorption spectrum (1), luminescence quantum spectra (3, 4) and its excitation (2) for silica glasses co-doped with Er, Al, Ni, Mg, Li (1–3) and Er, Al, Ni, Mg, Na (4). λ_{exc} , nm: 520 (3, 4); $\lambda_{\text{rec}} = 1530$ nm (2).

noteworthy, as indicated by the absence of these latter own excitation band at $\lambda = 320$ nm (see Fig. 2, curve 2). However, the efficiency of such luminescence in homogeneous glasses is very low, since it could not be registered at excitation in the absorption bands of Ni^{2+} in the visible and IR regions of the spectrum. Note that the value of the effective $\Delta\lambda$ band of sensitized luminescence of Er^{3+} ions is ~ 55 nm. This allows us to assume that Ni^{2+} ions, possessing a weak local field, do not enter the nearest surroundings of Er^{3+} ions.

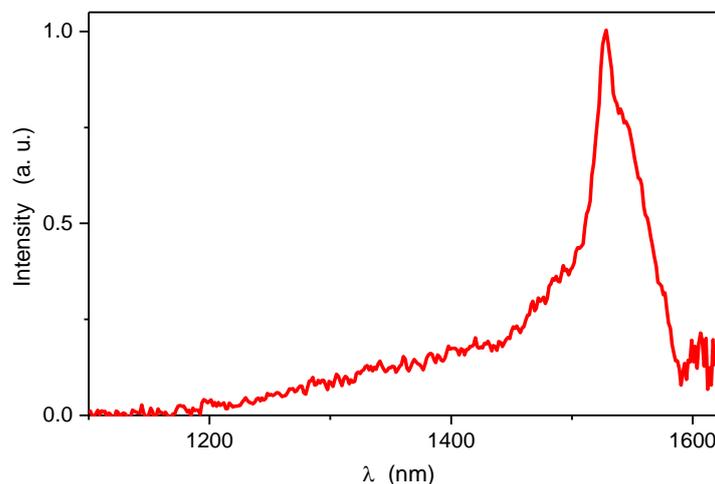


Fig. 3. Quantum spectrum of luminescence for silica glass co-doped with Er, Al, Ga, Ni, Li. $\lambda_{\text{exc}} = 320$ nm.

Thus, the formation in silica glass of complex optical centers including erbium and metal ions with high local electric field, as well as alkali metal with low strength of chemical bonding between it and oxygen allows to realize the effective half-width of the luminescence band ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ of Er^{3+} ions more than 62 nm.

This work was partially supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant No. F23V-011) and the scientific and technical program of the Union State "Component-F" (task 3.1).

1. Q. Qian, Q.Y. Zhang, H.F. Jiang et al., *Physica B*. **405**, 2220 (2010).
2. A. Speghini, M. Peruffo, M. Casarin, et al., *J. Alloys Compds.* **300–301**, 174 (2000).
3. L. Wetenkamp, G.F. West, H. Tobben, *J. Non-Cryst. Solids*. **140**, 35 (1992).
4. I. Savelii, H. El Hamzaoui, L. Bigot, et al., *Laser Phys. Lett.* **13**, 025108 (2016).
5. G.E. Malashkevich, V.V. Kouhar, N.V. Varapay, et al., *JAS*. **90**, 977 (2023).
6. W. Streck, P.J. Deren, E. Lukowiak, et al., *J. Non-Cryst. Solids*. **288**, 56 (2001).
7. W.A. Abu-raia, D.A. Aloraini, S.A. El-Khateeb, Aly Saeed, *Scientific Reports*. **12**, 16024 (2022).
8. K.N. Nishchev, A.A. Panov, A.I. Zaikin, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii Region. Fisiko-Matematicheskie Nauki*. № 1 (29), 97 (2014).

COMPACT LASERS BASED ON CRYSTALS WITH RARE EARTH IONS OPERATING IN THE VISIBLE SPECTRAL RANGE

P.G. Zverev

Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

E-mail: zverev@lst.gpi.ru

Solid-state lasers based on rare earth (RE) ions pumped with diode lasers make it possible to develop an efficient compact device operating at various wavelengths in the near-infrared spectral region. For the visible range, additional harmonics generation or parametric conversion is usually used, which require compliance with the phase matching conditions, as well as temperature stabilization. Therefore, the creation of RE ion lasers that directly generate coherent radiation in the visible region of the spectrum is of great interest.

Among the RE ions, we note the ions of Pr^{3+} , Sm^{3+} , Dy^{3+} , Tb^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , which have metastable energy levels, the transition from which gives radiation in the visible spectrum [1]. To excite them, it is necessary to use radiation from the blue and ultraviolet regions of the spectrum, which can fall into the fundamental absorption band of the matrix. Low absorption and luminescence cross sections are often observed for these levels, which limits the possibilities of creating effective visible range lasers.

When using co-activated crystals, excitation can be realized through up-conversion processes, that is, by transferring the excitation energy from several donor ions to an acceptor ion with a higher excitation energy. Yb^{3+} can be such a donor ion, in which there is only one excited level of $^5\text{F}_{5/2}$, with a lifetime of the order of milliseconds. The absence of high-energy levels leads to a lack of absorption from the excited state. That's why Yb^{3+} ions can be excited to a high level of the population inversion. Well-developed GaAs-based diode lasers with a generation wavelength of 940-980 nm can produce high power energy up to kW level. They well can be used as an efficient pump source for ytterbium active medium and further excitation of RE ions due to two-photon cooperative processes.

In this report we consider the issues of creating lasers based on Tb^{3+} , Pr^{3+} , Er^{3+} ions with excitation by blue semiconductor diodes, the achieved power in various generation modes, as well as the features of laser operation with up-conversion excitation by Yb^{3+} ions.

The work was carried out with the financial support from the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-00627.

1. H. Tanaka, S. Kalusniak, M. Badtke, et al., *Progress in Quantum Electron.* **84**, 100411, (2022).

2. N.K. Giri, S.B. Rai, A. Rai, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **74**, 1115 (2005).

LABORATORY LAYOUT OF THE FIRST-CLASS WORKING STANDARD FOR MEASURING THE VELOCITY OF LONGITUDINAL SOUND VIBRATIONS IN SOLIDS

V. V. Semashko^{1,2}, A.D. Shishkin^{1,2}

¹*Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan*

²*Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS,
Kazan*

E-mail: ars.shishkin@gmail.com

Modern ultrasonic flaw detectors, using technology for generating broadband ultrasonic pulses, make it possible to measure the speed of sound in various materials with an accuracy exceeding the accuracy specified in state standards. The purpose of this work is to develop a laboratory model of a first-class working standard for measuring the speed of longitudinal sound vibrations in solids. In accordance with GOST R 8.756-2014, the created working standard must allow measurements of the speed of sound in the standard sample by two different methods based on fundamental physical principles.

One of the fundamental characteristics of a solid is the refractive index n , which is related to the pressure wave - sound. The refractive index can be measured with an accuracy of 10^{-7} - 10^{-8} using interference methods [1]. Thus, using standard technology for measuring the speed of ultrasonic vibrations in materials by the delay time of reflected signals from the interfaces of different media and recording the travel time of an ultrasonic pulse between interfering laser beams, it is possible to independently determine the desired parameter.

This approach is implemented using a Jamin interferometer and a UDL-2M flaw detector. KS8 glass is used as the test sample. Laser radiation from a Nd:YAG laser causes an adiabatic pressure jump in the BGG 22 glued to the sample (ultrasonic pulse), which propagates deep into the sample. Signals from the interferometer were recorded by a photodetector with a time constant of about 10 ps and observed on an AKTAKOM ADS-2221MV oscilloscope. At the same time, using the UDL-2M, the speed of sound in the sample was measured by the time-of-flight method.

The experiments carried out indicate the possibility of constructing, according to the proposed scheme, a new working standard of the first category for the speed of longitudinal sound vibrations in transparent solids.

1. E. I. Butikov, *Optics: Textbook. 3rd ed., additional*, St. Petersburg: Lan Publishing House, 2012.

ERBIUM AND YTTERBIUM IONS EFFECT ON THE SPECTRAL-LUMINESCENCE PROPERTIES OF BISMUTHGERMANATE GLASSES

J.V. Zhegucheva¹, K.S. Serkina¹, I.V. Stepanova¹, A.A. Eliseeva¹, M.T. Metlin²

¹*D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology of Russia, Moscow*

²*Lebedev Physical Institute RAS, Moscow*

E-mail: stepanova.i.v@muctr.ru

Bismuth-germanate glasses exhibit broadband luminescence in the range of 1000–1500 nm, which allows them to be considered as promising media for optical amplification [1]. The introduction of Er³⁺ and Yb³⁺ ions into the glass composition helps to expand the spectral range of IR luminescence [2].

The purpose of this work was to study the influence of erbium and ytterbium ions on the spectral and luminescent properties of bismuth germanate glasses. Glasses with molar compositions 10Bi₂O₃-90GeO₂ and 10Bi₂O₃-85GeO₂-5Na₂O, doped with 0.1 mol.% Er₂O₃ and 0.2 mol.% Yb₂O₃, over 100%, were synthesized during the work. Excitation and luminescence spectra were recorded using a Jobin-Yvon Fluorolog QM-75-22-C spectrofluorimeter at 300 K using a 450 W Xenon arc lamp as the excitation source.

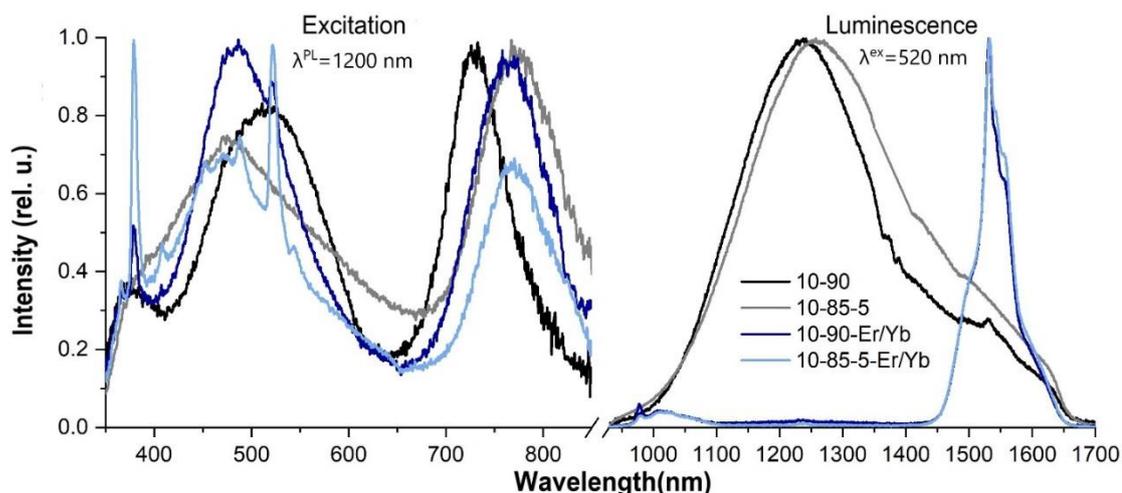


Fig. 1. Excitation and luminescence spectra of glasses.

The erbium and ytterbium oxides doping promotes the appearance of additional excitation and luminescence bands (Fig. 1). The IR region luminescence of bismuth germanate glasses doped with erbium and ytterbium is represented by transitions in the Yb³⁺ and Er³⁺ ions, while there is only luminescence of bismuth active centers (BACs) in undoped samples. It was also revealed that modification with sodium oxide leads to a broadening of the BAC's luminescence band and a shift of the excitation bands.

1. M. Peng et. al., J. Phys.: Condens. Matter, **21**, 285106 (2009).
2. G. Lakshminarayana et. al., J. Alloys Compd., **476** (1), 878-883 (2009).

SPECTRAL LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF Y₂O₃ CERAMICS: Tm-Ho

A.O. Ariskin¹, E.M. Bazaeva¹, M.V. Gerasimov¹, V.V. Osipov²,
R.N. Maksimov², P.A. Ryabochkina¹, V.A. Shitov²

¹ National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk

² Institute of Electrophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: alejandro.ariskin@yandex.ru

Materials based on one-and-a-half oxides doped with rare earth (RE) ions are of considerable interest for diode-pumped solid-state lasers [1,2]. High values of peak absorption and forced radiation cross sections, thermal conductivity and mechanical characteristics allow us to consider them as active media of solid-state lasers with high energy characteristics. However, due to the high melting point of these materials (~ 2450 °C), it is difficult to obtain them in the form of single crystals. In accordance with this, the interest of researchers is attracted by optical laser ceramics based on one-and-a-half oxides doped with RE ions.

In this paper, it is reported on the production of laser ceramics of yttrium oxide doped with Tm³⁺ ions and soldered with Ho³⁺ ions.

The interest in this ceramic is due to the possibility of pumping using semiconductor laser lines and matrices with a wavelength of ~ 800 nm at the level of ³H₄ Tm³⁺ ions. As a result of the interaction of Tm³⁺ ions through the process of cross-relaxation (³H₄→³F₄, ³H₆→³F₄), the level of ³F₄ Tm³⁺ ions is populated. From the ³F₄ level of Tm³⁺ ions, nonradiative energy transfer is carried out to the ⁵I₇ level of Ho³⁺ ions, which is the upper laser level when laser generation is obtained in the 2.1 μm region at the ⁵I₇→⁵I₈ transition of Ho³⁺ ions.

In this work, samples of the concentration range of Y₂O₃ ceramics were obtained: Tm, Ho (C_{Tm}=3 at.%, C_{Ho}=1, 3, 6 at.%). Optical microscopy revealed that optical defects in the form of pores are mainly concentrated in the near-surface areas of ceramic samples.

Studies of the spectral luminescent characteristics of Y₂O₃ ceramics: Tm, Ho (C_{Tm}=3 at.%, C_{Ho}=1, 3, 6 at.%) were performed, as a result of which the presence of nonradiative transfer from the ³F₄ level of Tm³⁺ ions to the ⁵I₇ level of Ho³⁺ ions was revealed.

1. L. Fornasiero, E. Mix, V. Peters, et al., New Oxide Crystals for Solid State Lasers Cryst. Res. Technol. **34**, 255–260 (1999).

2. K. Petermann, G. Huber, L. Fornasiero, et al., Rare-earth-doped sesquioxides Journal of Luminescence. **87**, 973-975(2000).

LASER WRITING OF BIREFRINGENT NANOSTRUCTURES IN SILICA GLASS FOR OPTICAL MEMORY

V.S. Tsarev¹, A.E. Levchenko¹, Y.V. Mikhailov², A.S. Lipatiev²,
A.G. Okhrimchuk¹

¹*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

²*D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology of Russia, Moscow*

E-mail: tvs@fo.gpi.ru

Optical memory based on silica glass has an advantage over analogues due to durability and large capacity. However, it also has a number of disadvantages. The elementary storage medium, called a voxel, has a larger size than magnetic media and a lower recording speed. This disadvantage is compensated by connecting a third coordinate. In addition, the use of submicron birefringent structures formed by exposing the same micron-sized area of glass to a sequence of femtosecond laser pulses with linear polarization. This made it possible to add another dimension to encode information – birefringence – and increase the recording density. Currently, the maximum write rate of birefringent voxels is 225 Kb/s, obtained in the laboratory of P. G. Kazansky [1].

In the above-mentioned method, energy modulation of femtosecond laser pulses with linear polarisation is applied, the rotation of which encodes the azimuth of the slow birefringence axis. Such a method is called pulse energy modulation (PEM), in which the total number of pulses is 8 pulses, the distance between which is at least 70 ns. We propose a new method to form birefringent voxels by focusing a declining subnanosecond comb of femtosecond laser pulses. The comb consists of two parts: the first pulse, whose characteristic energy is about 45 nJ, and an exponentially decreasing comb formed by the resonator. The characteristic energy of the exponential tail is 20 % of the energy of the first pulse. The optimal distance between pulses in the comb is 70 ps. The mechanism of recording by a subnanosecond comb is disclosed in [2]. But in this work exponentially decreasing comb of femtosecond pulses was used. In the present study, by controlling the envelope shape of the subnanosecond comb, we were able to reduce the total energy of the comb. Thus, the new subnanosecond comb of femtosecond laser pulses allows us to increase the formation rate of birefringent voxels up to 2 Gb/s

1. Y. Lei, et al., *Optica* **8**, 1365-1371 (2021).
2. A. Okhrimchuk, et al., *Sci Rep* **7**, 16563 (2017).

SOLID-STATE LASER ON A $Y_3Al_5O_{12}:Er$ CRYSTAL WITH LASER SEMICONDUCTOR PUMPING

A.M. Zhamkov, A.O. Ariskin, P.A. Ryabochkina

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk

E-mail: ryabochkina@mail.ru

Lasers generating radiation in the area of 1.5 microns are widely used in various practical applications: telecommunications, lidar installations, medicine, etc.

Laser generation in the region of 1.5 microns was obtained on crystals and glasses doped with Er^{3+} ions when they were soldered with Yb^{3+} ions [1]. In such active media, laser generation in the 1.5 μm region is carried out at the ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ transition of Er^{3+} ions, while pumping is carried out at the ${}^2F_{5/2}$ level of Yb^{3+} ions, and the population of the upper laser level ${}^4I_{13/2}$ occurs due to nonradiative energy transfer from Yb^{3+} ions to Er^{3+} ions.

Currently, there is an alternative method for obtaining laser generation in the 1.5 μm region at the ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ transition of Er^{3+} ions with resonant pumping to the ${}^4I_{13/2}$ level [2].

In this paper, a simulation of the operation of a laser on a yttrium-aluminum garnet crystal doped with Er^{3+} ions, generating radiation in the region of 1.5 microns at the ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ transition of Er^{3+} ions in continuous and Q-modulated mode using an acousto-optic shutter, is performed. A comparative analysis of the simulation results with the experiment is performed.

1. D. A. Bondarenko, V. E. Karasik, L. N. Magdich et al., Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. **5**, 30 (2017).

2. K. N. Gorbachenya, S. V. Kurilchik, V. E. Kisel et al., Quantum Electronics. **46**, 6 (2016).

ANALYSIS OF EDTA INFLUENCE ON GROWTH PARAMETERS AND OPTICAL PROPERTIES OF KDP CRYSTAL

S.A. Vilchenko, V.V. Gribko

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod

E-mail: sergey.vilchenko@yandex.ru

Potassium dihydrophosphate (KDP) crystals are actively used for the production of optical elements in laser systems. Studying the possibility of improving the growth technology of KDP crystals is one of the promising tasks. Thus, to increase the growth rate of tetragonal prism and bipyramid faces of KDP crystal, as well as to reduce the influence of trivalent metal ions on the growth process, various complexons can be used. One of such chemical compounds is ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA).

To study the effect of EDTA on the growth of KDP crystals and their morphology, a number of impurity concentrations in the growth solution were chosen: 0.001, 0.005, 0.015, 0.02, 0.035, 0.05 mol %. It follows from the data obtained that the addition of EDTA leads to a decrease in the dead zone and an increase in the prism face growth rate as a function of supersaturation.

Transmission spectra of the grown crystals were also obtained; addition of EDTA to the growth solution led to an increase in the transmittance value in the wavelength range 250–1100 nm (Fig. 1).

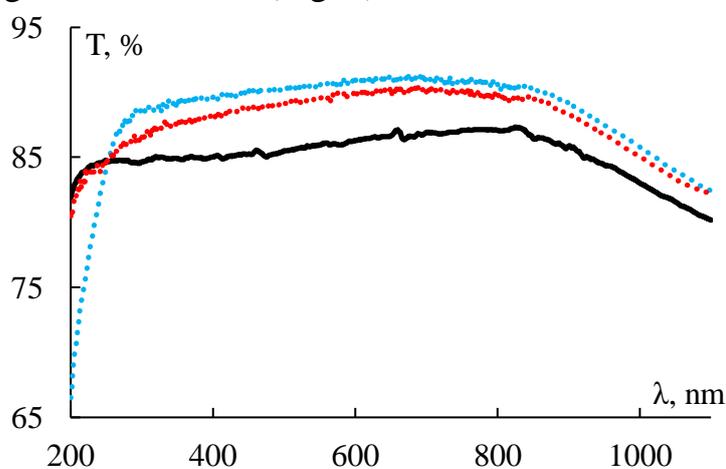


Fig. 1. Transmission spectra of the grown crystal (black – KDP without EDTA, blue – KDP with added EDTA $C = 0.005$ mol%, red – KDP with added EDTA $C = 0.025$ mol%).

The study shows that the addition of EDTA to the growth solution leads to an increase in the rate of facet growth without disturbing the crystal structure. The effect of EDTA on growth parameters and properties of KDP crystal show promising results for further investigation of EDTA concentration series in KDP growth solutions.

DIAMOND BLADE PROCESSING OF KRS-5 CRYSTALS

A.A. Pakhomova, M.S. Kuznetsov, K.S. Zaramenskikh, S.M. Pilyushko,
A.R. Romanenko, M.V. Morozov

*JSC "State Research and Design Institute of Rare Metal Industry "Giredmet",
Moscow*

E-mail: AAPakhomova@rosatom.ru

KRS-5 crystals (TlBr –TlI) have high values of indicators necessary for functional optical materials used to create various elements (lenses, prisms, etc.). Uniform transparency in the IR and visible spectral regions (0.35-50 microns), transmission up to 70% in the absence of absorption bands, the ability to the achievement of absolute transmittance when applying an antireflection coating, mechanical, vibration strength, chemical and moisture resistance make it possible to call this optical material one of the most promising [1–3].

The problems hindering the widespread use of KRS-5 crystals are related to the inability to use traditional processing methods. The material is soft, plastic, has a high coefficient of thermal expansion, low thermal conductivity, high anisotropy, therefore, after processing, a deep disturbed layer of the crystal structure is formed. A suitable method is diamond blading on ultra-precision machines.

Preliminary experiments on the processing of a cylindrical billet from KRS-5 showed an alternation of brittle fracture zones and defect-free zones, which leads to the conclusion that crystallographic orientation affects surface quality. Considering the influence of the position of the KRS-5 workpiece on the quality of the final material, a two-stage crystal processing technique by diamond milling was implemented instead of the turning technique.

During the first stage, the best orientation of the workpiece was determined, the stage was implemented on an ultra-precision stand. During processing, the workpiece performed rotational movements around its axis. The trajectory of the diamond cutter passed through the axis of rotation of the workpiece.

According to the location of the brittle fracture zones formed during processing, taking into account the known trajectory of the cutter, conclusions were drawn about the optimal orientation of the workpiece, capable of providing plastic removal of the material without brittle destruction.

The second stage consisted in processing a correctly oriented part. At this stage, the workpiece was moving relative to the milling head with a feed motion without rotation. The remaining traces of brittle fracture after the first stage were completely eliminated by processing in the new mode. Further processing was carried out in finishing modes with a diamond cutter with a radius of 5 mm. At the same time, the complete elimination of traces of destruction is possible provided that the processing method and the position of the workpiece are correctly determined.

Crystals with a surface roughness typical for KRS-5 – Ra of 0.01 microns were obtained.

It is possible to improve the accuracy and quality of processing.

The proposed method of processing KRS-5 crystals will increase the productivity of manufacturing optical products while ensuring the necessary accuracy and quality.

The authors express their gratitude to the staff of the Scientific and Production Association "Aspherica" – E.M. Zakharevich and V.V. Lapshin for their participation in conducting theoretical and experimental research.

1. T. I. Darvoyd, E. K. Karlova, H. B. Karlov, *Quantum Electronics*. Vol. **2**, No. 4, pp. 765–772 (1975).

2. M. S. Kuznetsov, K. S. Kiseleva, I. S. Lisitsky, *Non-Ferrous Metals*. No. **4**, pp. 81–84 (2011).

3. I. S. Lisitsky, M. S. Kuznetsov, K. S. Zaramenskikh et al., *Non-Ferrous Metals*. No. **11**, pp. 67–71 (2012).

STUDY OF POLARIZATION MODE DYNAMICS IN A SHORT CAVITY FIBER LASER

V.A. Kamynin, A.I. Trikshev, A.V. Shirmankin, A.A. Rybaltovsky,
S.E. Sverchkov, B.I. Denker, V. B. Tsvetkov
Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
E-mail: shirmankin123@gmail.com

Narrow line fiber lasers that generate two orthogonally polarized cavity modes are of interest as precision linear temperature and strain sensors [1]. The beat frequency of the polarization modes is in the radio frequency (RF) range. This offers the advantages of easy interrogation, high signal-to-noise ratio, absolute encoding, and the ability to multiplex multiple sensors.

In this work, a fiber laser with a short Fabry-Perot cavity was investigated. The active element was a composite ytterbium fiber of standard diameter (125 μm) with a high content (2.5 wt. %) of Yb^{3+} ions in the core [2]. The resonator was formed on a ~ 2 cm section of the fiber by two Bragg gratings with a reflection maximum at a wavelength of ~ 1069 nm. Radiation with a wavelength of 976 nm was used for pumping. The color map of laser output emission obtained at different pump powers is shown in Fig. 1a.

The laser was generated in the continuous wave regime, and beats of orthogonally polarized modes were observed at a frequency of 18.4 GHz (Fig. 1 b). This value corresponded to an effective resonator length of 5.5 mm. The beat frequency varied from 18.403 to 18.415 GHz depending on the cavity temperature (Fig. 1 c).

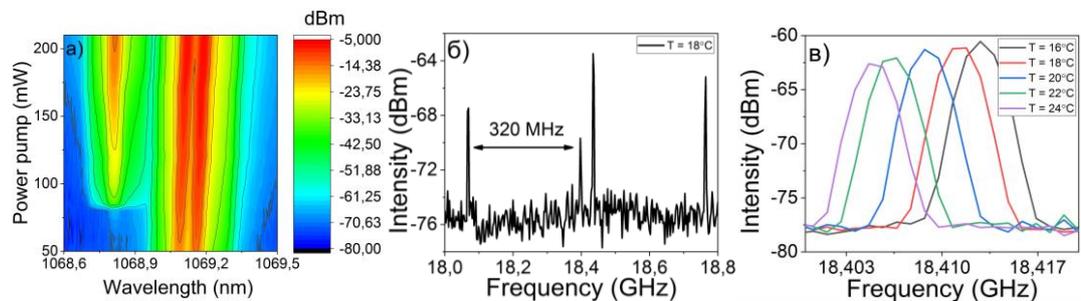


Fig. 1. a) Colormap of the emission spectra measured at different pump powers; b) RF radiation spectrum; c) RF radiation spectrum at different resonator temperatures.

Beats at a lower frequency of 300 MHz were also recorded. With changes in temperature and laser pump power, the frequency of these beats varied in the range of 230 to 330 MHz.

1. Y.-N. Tan et al. *Opt. Express*, vol. **19**, N 21, pp. 20650-20656, (2011).
2. M. Yu. Koptev et al. *Photonics*, vol. **9**, p. 760, (2022).

RESEARCH OF COMPOSITE OF THE TAPERED FIBER–CRYSTAL BaF₂:Yb:Er

A.V. Shirmankin, V.A. Kamynin, S.V. Kuznetsov, V.A. Konyuskin,
A.N. Nakladov, A.A. Alexandrov, V.B. Tsvetkov
Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia
E-mail: andreishirmankin34@gmail.com

Crystals and fibers doped with rare earth elements (REE) form the basis of most modern laser systems. Thus, crystals make it possible to achieve high specific gains, and fibers have a number of technological advantages (effective cooling, resistance to external influences, compatibility with other fiber devices) [1,2]. Combining the best qualities of different types of active media is an interesting and non-trivial task, the solution of which will allow achieving optimal results for the quality of the generated radiation.

In this work, the possibility of introducing luminescence from a BaF₂:Yb:Er crystal into a conical optical fiber was studied. To do this, using the Vytran GPX 3400 installation, several samples of conical fibers (tapers) with different longitudinal profile geometries were created, that is, with different lengths and diameters of the waists. Tapers with lengths from 4 to 5 cm and waist diameters from 15 to 30 μm were created (an example of one of the tapers is shown in the inset in Fig. 1). For their manufacture, standard single-mode fiber SMF 28 was used. Next, the tapers were placed on a BaF₂:Yb:Er crystal with a diameter of 10 mm, forming an optical contact between the waist and the surface of the crystal. Transverse pumping of the crystal was carried out using a multimode diode laser with a lasing wavelength of about 976 nm. The luminescence introduced into the conical fiber was analyzed using a Yokogawa AQ6370D optical spectrum analyzer. As a result, the possibility of introducing luminescence from BaF₂:Yb:Er crystals into conical fibers was demonstrated (Fig. 1).

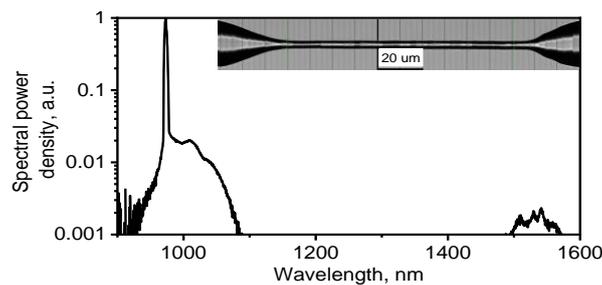


Fig. 1. Spectrum power density of complex tapered fiber and crystal BaF₂:Yb:Er and profile tapered fiber on the insert.

The result obtained shows the possibility of transverse input of radiation from external sources into a conical fiber. In the future, using this complex of a conical fiber and a crystal doped with rare earth elements, it is possible to create optical amplifiers or fiber lasers pumped through the side surface.

1. G. Huber, C. Krankel, K. Petermann, J. Opt. Soc. Am. B. **27**, B93 – B105 (2010).
2. S. Addanki, I. S. Amiri, P. Yupapin, Elsevier. **10**, 743 - 750 (2018).

Лазерные технологии в биологии
и медицине

ОПТОАКУСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДЕФЕКТΟΣКОПИИ И МЕДИЦИНЕ

В.В. Семашко^{1,2}, А.А. Карабутов³, А.А. Ораевский⁴, Ю.П. Бродниковский⁴

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*

²*Казанский физико-технический институт
им. Е.К. Завойского ФИЦ КАЗ РАН, Казань*

³*Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН, Москва*

⁴*ООО «Томовейв лазер», Казань*

E-mail: ua4pcy@mail.ru

Цель доклада: познакомить слушателей школы с уникальной технологией оптоакустической диагностики различных материалов и изделий, а также перспективы применения этой технологии для медицины и фармацевтики.

В материаловедении технология успешно применяется для интроскопии металлов, сплавов, композитов (в т.ч. армированных углеродным и углеродным волокном) и т.д. Она позволяет выявлять локальные неоднородности их внутренней структуры (плотность, модули упругости, пористость, наличие трещин, включений, грануляции, расслоения, дефектов склейки и т.д.) и осуществлять оценку остаточной прочности конструкций, распределение остаточных и действующих механических напряжений и т.д. с пространственным разрешением в 2-5 раз превышающей традиционный ультразвуковой контроль.

В медицине ее внедрение позволит выйти на принципиально новый уровень диагностики и лечения «под контролем» онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний. Она позволяет осуществлять микроангиографию и функциональную микроскопия капилляров, внутрисосудистую визуализацию атеросклеротических бляшек, процессов тромбообразования, а также позволяет осуществлять сверхтонкую диагностическую визуализацию при размере опухоли < 1–3 мм. Кроме того, она обладает огромными перспективами применения в фармацевтике в части разработки новых препаратов направленного действия. Технология допускает комбинацию с другими методами диагностики путем встраивания в различные специализированные диагностические комплексы.

ФИЦ КазНЦ РАН совместно с ИОФ РАН занимается созданием линейки приборов на основе дефектоскопа УДЛ-2М и аналога медицинского оптоакустического томографа «Symphony» группы компании Tomowave (США-Китай-Россия).

ОПТИЧЕСКАЯ УЛЬТРАМИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ВОДНЫХ СРЕДАХ ДЛЯ ЗАДАЧ БИМЕДИЦИНЫ

Ю.Г. Вайнер^{1,2}, Г.О. Силаев^{1,2}, В.З. Ланкин³, А.Т. Шайдулин^{2,4},
Е.О. Орловская⁴, Ю.В. Орловский⁴

¹*Институт спектроскопии РАН, Москва, Троицк*

²*Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва*

³*Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии
им. академика Е.И. Чазова Минздрава, Москва*

⁴*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
E-mail: vainer@isan.troitsk.ru*

Стандартными методами визуализации наночастиц (НЧ) являются электронная и атомно-силовая микроскопия. Однако они малодоступны, характеризуются сложной процедурой подготовки образца и большим временем измерения и, кроме того, оказывают нежелательное воздействие на исследуемые объекты. Принципиальным недостатком электронной микроскопии является то, что этот метод практически неприменим для исследований образцов в водных средах, что сильно ограничивает возможности его использования для изучения биологических объектов.

Методы оптической диагностики свободны от этих недостатков, но обладают более низким пространственным разрешением. Существенно, что они характеризуются высокой оперативностью, более доступны и позволяют достичь чувствительность, достаточную для визуализации одиночных НЧ, атомов и молекул.

В докладе сообщается о реальных возможностях и результатах применения разработанного в коллективе высокочувствительного лазерного ультрамикроскопа [1], предназначенного для исследований в водных средах одиночных НЧ, включая НЧ биологической природы. Разработанный микроскоп позволяет визуализировать одиночные НЧ размерами до 10 нм и менее, измерять их гидродинамический диаметр, основываясь на анализе траекторий их броуновского движения, изучать процессы агрегации анализируемых НЧ и определять плотность образуемых агрегатов. В частности, излагаются результаты изучения процессов агрегации кристаллических НЧ лантана фторида LaPO_4 , допированных ионами празеодима Pr^{3+} , синтезированных с применением метода гидротермального коллоидного синтеза; предназначенных для УФ-С терапии раковых опухолей, обсуждаются результаты диагностики растворов липопротеинов низкой плотности, выделенных из плазмы человеческой крови, приводятся примеры изучения водных растворов других НЧ.

1. G.O. Silaev *et al*, Phys. Wave Phenom. **31**, 160–170 (2023).

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦАХ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ РЗ-ИОНОВ И ЕГО ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ

С.А. Хрущалина, П.А. Рябочкина, В.И. Шляпкина, С.Э. Кукаркина,
Е.Э. Зимин, А.Д. Таратынова, М.В. Журавлев, А.А. Гадеева, В.С. Бобров,
А.С. Алексеева

*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск
E-mail: anabel-2005@yandex.ru*

В диэлектрических наночастицах, легированных редкоземельными (РЗ) ионами, при их возбуждении в полосы поглощения данных ионов, как правило, возникает люминесценция. При повышении концентрации РЗ-ионов и плотности мощности возбуждающего излучения в указанных частицах может появиться тепловое излучение [1]. Нами был предложен механизм возникновения этого излучения. Также исследование частиц различных составов показало, что наличие данного излучения зависит от ширины запрещенной зоны материала и количества дефектов в нем.

Поскольку под действием интенсивного лазерного излучения частицы значительно нагреваются, то они могут быть использованы для усиления теплового эффекта лазерного излучения, например, на биологическую ткань. Нами были проведены эксперименты *in-vitro* и *in-vivo*, которые позволили выбрать наиболее подходящие для этой цели частицы. В ходе экспериментов *in-vivo* продемонстрирована возможность лечения злокачественного поверхностного новообразования (меланомы В16) путем воздействия 980 нм лазерного излучения с предварительным покрытием частицами на основе диоксида циркония, легированного иттербием, а также при внутриопухолевом расположении этих частиц. Определена цитотоксичность частиц.

В настоящей работе представлено обобщение результатов исследования теплового излучения в различных частицах и результатов вышеупомянутых экспериментов *in-vitro* и *in-vivo*.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-01099, <https://rscf.ru/project/23-72-01099/>.

1. P.A. Ryabochkina, S.A. Khrushchalina, V.M. Kyashkin et al. JETP Lett. **103**, 743-761 (2016).

2. P.A. Ryabochkina, S.A. Khrushchalina, A.N. Belyaev et al., Quant. El. **51**, 1038–1043 (2021).

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ LiHoF_4 В КАЧЕСТВЕ ВИЗУАЛИЗАТОРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ КВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

В.И. Колесникова¹, Г.С. Шакуров², О.А. Морозов^{1,2}, С.Л. Кораблева¹,
В.В. Семашко^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, Казань

E-mail: kazlerka@gmail.com

В биофизике и биомедицине существует фундаментальная проблема объяснения механизмов лечебного воздействия низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высоких частот (КВЧ) до 300 ГГц [1]. Клинически установлено, что воздействие КВЧ излучения сопровождается пролиферативным эффектом и способствует заживлению ран и восстановления клеточных структур после воспалений. Однако природа и связь биофизических процессов с энергетическими характеристиками КВЧ излучения до сих пор однозначно не установлена, в частности, из-за проблем пространственной метрологии электромагнитного излучения этого диапазона.

В работе показано, что микрочастицы (м/ч) LiHoF_4 являются, одновременно, материалом, эффективно поглощающим КВЧ излучение и термочувствительным люминофором. Совокупность этих свойств представляется перспективной для визуализации пространственного распределения и измерений интенсивности КВЧ излучения.

Впервые изучены спектры поглощения м/ч LiHoF_4 в области 200-600 ГГц. Исследованы температурные зависимости оптических спектров возбуждения, люминесценции и кинетики люминесценции этих м/ч в диапазоне температур от 80 до 340 К. Установлено, что эти частицы с успехом могут быть использованы для люминесцентной LIR-термометрии. При этом наибольшая абсолютная температурная чувствительность реализуется для перехода ${}^5F_5 - {}^5I_8$ ионов Ho^{3+} достигая значений $\sim 0.35 \text{ K}^{-1}$ при температуре 80 К и $\sim 0,028 \text{ K}^{-1}$ в области комнатных температур. Оценки, произведенные в [2], показывают, что по изменению цветовых характеристик люминесценции данных частиц можно осуществить визуализацию распределения интенсивности КВЧ излучения в рабочей области выпускаемых промышленностью физиотерапевтических КВЧ-аппаратов. Кроме того, м/ч LiHoF_4 могут быть также использованы в задачах онкологической электромагнитной и фотодинамической терапии.

Исследования проводились в рамках государственного задания ФИЦ «Казанский научный центр РАН».

1. V.V. Kir'yanova, et al, Russian Journal of Physiotherapy, Balneology and Rehabilitation 15, 209-215 (2016).

2. V.V. Semashko, et.al. The 30th Int.Conf. on Advanced Laser Technologies (ALT'23), Samara, Russia, N-I-3, Sep.18-21 (2023).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВЛК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН ВОЛН

А.Д. Таратынова, А.Н. Беляев, О.С. Бушукина, В.И. Давыдкин,
П.А. Рябочкина, С.А. Хрущалина

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск
E-mail: taratynova@e-mordovia.ru

Метод эндовазальной лазерной коагуляции (ЭВЛК), используемый для лечения варикозной болезни, является малоинвазивным и на сегодняшний день самым популярным среди всех способов лечения варикозного расширения вен (используется в 70 % случаев данного заболевания). И несмотря на развитие данной методики и сегодня после проведения данной процедуры встречается ряд осложнений, среди которых наиболее частыми являются гематомы и парестезии [1].

Большинство публикаций, анализирующих осложнения после ЭВЛК, свидетельствуют о том, что количество послеоперационных осложнений зависят от характеристик используемого лазерного излучения (длины волны, значения мощности излучения), а также скорости извлечения оптического световода из венозного сосуда [2].

Для решения проблемы оптимизации процедуры ЭВЛК необходимо установить зависимость между энергетическими характеристиками лазерного излучения и диаметром сосуда. Одним из способов определения оптимальных параметров для проведения ЭВЛК является компьютерное моделирование [3,4].

В рамках данной работы будет рассмотрен способ компьютерного моделирования в программном обеспечении COMSOL Multyphysics, как средство создания модели процесса, оценены результаты моделирования и проведен их сравнительный анализ с результатами экспериментов in-vivo.

1. J.Y. Park, et al., Dermatol Surg. 40(4), 383-389 (2014).
2. A.B. Massaki, et al., Lasers Surg Med. 45(2), 123-129 (2013).
3. S. Mordon , et al., BioMedical Engineering OnLine 5, N. 26 (2006).
4. A.A. Poluektova, et al., Lasers Med Sci. 29(2):441-452 (2014).

Laser technologies in biology and medicine

OPTOACUSTIC TECHNOLOGIES IN DEFECTOSCOPY AND MEDICINE

V.V. Semashko^{1,2}, A.A. Karabutov³, A.A. Oraevsky⁴, Yu.P. Brodnikovskiy⁴

¹ *Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan*

² *E.K. Zavoisky Kazan Institute of Physics and Technology, FRC KazSC RAS,
Kazan*

³ *Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

⁴ *Tomowave Laser LLC, Kazan*

E-mail: ua4pcy@mail.ru

The purpose of the report is to introduce to the unique technology of optoacoustic diagnostics of various materials and products, as well as the prospects for using this technology for medicine and pharmaceuticals.

In materials science, the technology is successfully used for introscopy of metals, alloys, composites (including those reinforced with carbon and carbon fiber), etc. It allows you to identify local inhomogeneities in their internal structure (density, elastic moduli, porosity, the presence of cracks, inclusions, granulation, delamination, gluing defects, etc.) and assess the residual strength of structures, the distribution of residual and effective mechanical stresses, etc. with a spatial resolution 2–5 times higher than traditional ultrasonic testing.

In medicine, its implementation will allow us to reach a fundamentally new level of diagnosis and treatment “under control” of oncological and cardiovascular diseases. It allows microangiography and functional microscopy of capillaries, intravascular visualization of atherosclerotic plaques, thrombus formation processes, and also allows for ultra-early diagnostic imaging for tumor sizes < 1–3 mm. In addition, it has great prospects for use in pharmaceuticals in terms of the development of new targeted drugs.

The technology allows combination with other diagnostic methods by being integrated into various specialized diagnostic complexes.

The Federal Research Center of the Kazakh Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, together with the Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences, is creating a line of devices based on the UDL-2M flaw detector and an analogue of the medical optoacoustic tomograph “Symphony” from the Tomowave group of companies (USA-China-Russia).

OPTICAL ULTRAMICROSCOPY OF SINGLE NANOPARTICLES IN AQUEOUS ENVIRONMENTS FOR BIOMEDICAL PURPOSES

Yu.G. Vainer^{1,2}, G.O. Silaev^{1,2}, V.Z. Lankin³, A.T. Shaidulin^{2,4},
E.O. Orlovskaya⁴, Yu.V. Orlovsky⁴

¹*Institute of Spectroscopy RAS, Moscow*

²*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

³*National Medical Research Center of Cardiology
named after Ye.I. Chazov of the Ministry of Health
of the Russian Federation, Moscow*

⁴*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
E-mail: vainer@isan.troitsk.ru*

Standard methods for visualizing nanoparticles (NPs) are electron and atomic force microscopy. However, they are not readily available and are characterized by a complex sample preparation procedure and a long measurement time and, in addition, have an undesirable effect on the objects under study. The fundamental disadvantage of electron microscopy is that this method is practically inapplicable for studying samples in aqueous environments, which greatly limits the possibilities of its use for investigation of biological objects.

Optical diagnostic methods are free from these disadvantages, but have a lower spatial resolution. It is important that they are characterized by high efficiency, are more accessible and allow achieving sensitivity sufficient for visualizing single NPs, atoms and molecules.

The talk reports on the real possibilities and results of using a highly sensitive laser ultramicroscope developed by the team [1], intended for studying single NPs in aqueous environments, including NPs of biological nature. The developed microscope makes it possible to visualize single NPs with sizes up to 10 nm or less, measure their hydrodynamic diameter based on the analysis of the trajectories of their Brownian motion, study the processes of aggregation of the analyzed NPs, and determine the density of the formed aggregates. In particular, the results of studying the processes of aggregation of crystalline lanthanum fluoride LaPO₄ NPs doped with praseodymium Pr³⁺ ions, synthesized using the hydrothermal colloidal synthesis method, intended for UV-C therapy of cancer tumors, are presented; the results of diagnostics of solutions of low-density lipoproteins isolated from human blood plasma are discussed, examples of studying aqueous solutions of other NPs are given.

1. G.O. Silaev *et al*, Phys. Wave Phenom. **31**, 160–170 (2023).

THERMAL RADIATION IN DIELECTRIC NANOPARTICLES
WITH HIGH CONCENTRATION OF RE IONS AND ITS POSSIBLE
APPLICATION IN MEDICINE

S.A. Khrushchalina, P.A. Ryabochkina, V.I. Shlyapkina, S.E. Kukarkina,
E.E. Zimin, A.D. Taratynova, M.V. Zhuravlev, A.A. Gadeeva, V.S. Bobrov,
A.S. Alekseeva

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk
E-mail: anabel-2005@yandex.ru

In dielectric nanoparticles doped with rare-earth (RE) ions, when they are excited in the absorption bands of these ions, luminescence usually occurs. With an increase in the concentration of RE ions and the power density of the exciting radiation in these particles, thermal radiation may appear [1]. We have proposed a mechanism for the occurrence of this radiation. Also, a study of particles of various compositions showed that the presence of this radiation depends on the width of the forbidden zone of the material and the number of defects in it.

Since the particles heat up significantly under the action of intense laser radiation, they can be used to enhance the thermal effect of laser radiation, for example, on biological tissue. We conducted in-vitro and in-vivo experiments, which allowed us to select the most suitable particles for this purpose. During the in-vivo experiments, the possibility of treating a malignant superficial neoplasm (melanoma B16) by exposure to 980 nm laser radiation with preliminary coating with particles based on zirconium dioxide doped with ytterbium, as well as with the intratumoral location of these particles, was demonstrated. The cytotoxicity of the particles was determined.

This paper presents a summary of the results of the study of thermal radiation in various particles and the results of the above-mentioned in-vitro and in-vivo experiments.

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-72-01099, <https://rscf.ru/project/23-72-01099/>.

1. P.A. Ryabochkina, S.A. Khrushchalina, V.M. Kyashkin et al. JETP Lett. **103**, 743-761 (2016).

2. P.A. Ryabochkina, S.A. Khrushchalina, A.N. Belyaev et al., Quant. El. **51**, 1038–1043 (2021).

ON POSSIBLE IMPLEMENTATION OF LiHoF₄ MICROPARTICLES TO THE VISUALISATION OF EHF RADIATION INTENSITY

V.I. Kolesnikova, G.S. Shakurov², O.A. Morozov^{1,2}, S.L. Korableva¹,
V.V. Semashko^{1,2}

¹*Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia*

²*E.K. Zavoisky Kazan Institute of Physics and Technology,
FRC KazSC RAS, Kazan*

E-mail: kazlerka@gmail.com

In biophysics and biomedicine, there is a fundamental problem of explaining the mechanisms of the therapeutic effects of low-intensity extremely high frequencies electromagnetic radiation (EHF) up to 300 GHz [1]. It has been clinically established that exposure to EHF radiation is accompanied by a proliferative effect and promotes wound healing and restoration of cellular structures after inflammation. However, the nature and connection of biophysical processes with the energy characteristics of EHF radiation have not yet been clearly established, in particular due to the problems of spatial metrology of electromagnetic radiation in this range.

The report shows that at the same time microparticles (m/p) of LiHoF₄ are a material that effectively absorbs EHF radiation and a thermosensitive phosphor. The combination of these properties seems promising for visualizing the spatial distribution and measurements of EHF radiation intensity.

The LiHoF₄ m/p absorption spectra in the region of 200-600 GHz were studied for the first time. The temperature dependences of the optical excitation spectra, luminescence and luminescence kinetics of these particles have been studied in the temperature range from 80 to 340 K. It has been established that these particles can be successfully used for luminescent LIR thermometry. In this case, the highest absolute temperature sensitivity is realized for the ⁵F₅ – ⁵I₈ transitions of Ho³⁺ ions reaching values of ~0.35 K⁻¹ at a temperature of 80 K and ~0.028 K⁻¹ at room temperatures. Estimates performed in [2] show that changes in the color characteristics of their luminescence properties make it possible to visualize the distribution of EHF radiation intensity in the working area of industrially produced physiotherapeutic EHF devices. In addition, LiHoF₄ m/p can be used in oncological electromagnetic and photodynamic therapy tasks.

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”.

1. V.V. Kir’yanova, et al, Russian Journal of Physiotherapy, Balneology and Rehabilitation 15, 209-215 (2016).

2. V.V. Semashko, et.al. The 30th Int.Conf. on Advanced Laser Technologies (ALT’23), Samara, Russia, N-I-3, Sep.18-21 (2023).

MODELING OF THE EVLC PROCESS AND DETERMINATION
OF THE TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF A VEIN DURING
EXPOSED TO LASER RADIATION OF VARIOUS WAVELENGTHS

A.D. Taratynova, A.N. Belyaev, O.S. Bushukina, V.I. Davydkin,
S.A. Khrushchalina

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk

E-mail: taratynova@e-mordovia.ru

The endovenous laser coagulation (EVLC) method used to treat varicose veins is minimally invasive and the most popular method of treating varicose veins (used in 70% of cases of this disease). And despite the development of this method, even today, after this procedure, a number of complications occur, among which hematomas and paresthesia are the most common [1].

Most publications analyzing complications after EVLC indicate that the number of postoperative complications depends on the characteristics of the laser radiation used (wavelength, radiation power values) and the rate of extraction of the optical fiber from the venous vessel [2].

To solve the problem of optimizing the EVLC procedure, it is necessary to establish a relationship between the energy characteristics of laser radiation and the diameter of the vessel. One of the ways to determine the optimal parameters for conducting EVLC is computer modeling [3,4].

In this work, the method of computer modeling in COMSOL Multiphysics software will be considered as a means of creating a process model, the simulation results will be evaluated and their comparative analysis with the results of in vivo experiments will be carried out.

1. J.Y. Park, et al., *Dermatol Surg.* 40(4), 383-389 (2014).
2. A.B. Massaki, et al., *Lasers Surg Med.* 45(2), 123-129 (2013).
3. S. Mordon, et al., *BioMedical Engineering OnLine* 5, N. 26 (2006).
4. A.A. Poluektova, et al., *Lasers Med Sci.* 29(2):441-452 (2014).

Электронные явления
в наноструктурах

ГЛУБОКИЕ АКЦЕПТОРНЫЕ ПРИМЕСИ В GaAs

Н.С. Аверкиев, А.А. Гуткин
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург
E-mail: averkiev@les.ioffe.ru

Примеси в кристаллах представляют собой объект, который делает каждый образец уникальным. Если кристалл совершенен, то его свойства унифицированы, а легирование различными атомами отличает один образец от другого и придает кристаллам различные свойства. Так что изучение примесей в твердом теле, и в полупроводниках, в частности представляет собой фундаментальную физическую задачу, решению которой традиционно уделяется внимание во многих научных центрах. Энергетические уровни, которые возникают в запрещенной зоне кристалла с примесями, можно разделить на мелкие и глубокие. К первым относят водородоподобные центры, размер волновой функции которых намного превосходит размеры элементарной ячейки, и их свойства поэтому в значительной степени определяются именно кристаллом. Центры, дающие уровни с большей энергией связи, имеют характерный размер волновой функции локализованных на них носителей порядка одного нанометра. В этой ситуации становится с одной стороны существенным внутренние взаимодействия этих носителей заряда друг с другом и с электронами внутренних оболочек примеси, локальными колебания и т.д., а с другой – существенную роль играет и исходный кристалл. В докладе представлены результаты детального исследования электронного и пространственного строения трех типов глубоких акцепторных центров в арсениде галлия: парамагнитная примесь MnGa, двухзарядные акцепторы, возникающие при введении в кристалл элементов из 1 группы периодической таблицы с заполненной d-оболочкой, сложный комплекс содержащий атом теллура, замещающий атом мышьяка TeAs и вакансию на месте галлия VGa.

Установлено, что в каждом из этих центров имеется внутреннее взаимодействие, которое и определяет их свойства и созданы нетривиальные модели центров. Для MnGa определяющим его особенности является обменное взаимодействие локализованной дырки со спином $3d^5$ электронов внутренней оболочки марганца, для CuGa, AgGa, AuGa это взаимодействие с локальными колебаниями (эффект Яна-Теллера), для VGaTeAs это эффект Яна-Теллера и взаимодействие компонент комплекса. Основные результаты исследований опубликованы во многих работах и в трех обзорах, в которых обобщены результаты исследований авторов.

Введение парамагнитного иона Mn в арсенид галлия приводит к появлению относительно глубокого акцепторного уровня в запрещенной зоне с энергией связи 110 мэВ. С этим уровнем связано возникновение полосы фотолюминесценции, которая была исследована методами пьезоспектроскопии и магнитооптики. Основным отличием от поведения мелкого акцептора был обратный знак степени круговой поляризации

излучения при рекомбинации фотовозбужденного электрона с дыркой, локализованной на Mn по отношению к переходам на мелкий акцептор и меньшая величина предельной степени линейной поляризации при одноосном давлении и круговой поляризации в магнитном поле в геометрии Фарадея. Эти отличия и результаты других многочисленных экспериментов, включающих ЭПР, поглощение ультразвука, магнитную восприимчивость GaAs:Mn нашли объяснение в модели предполагающей сильное обменное взаимодействие дырки с полным моментом $3/2$ со спином пяти $3d^5$ электронов, равным $5/2$. Основным состоянием оказалось антиферромагнитное состояние с полным моментом 1. Работы авторов относятся к свойствам одиночного центра Mn (уровни легирования до 10^{18} см $^{-3}$), но они позволили создать модель магнитного упорядочения в GaAs, легированного марганцем до уровня нескольких атомных процентов.

Поскольку атомы Cu, Ag, Au замещают атом Ga (III группа периодической таблицы), в нейтральном состоянии на этой примеси локализована две дырки. Размер волновой функции носителей заряда составляет порядка нескольких Å, так что замещающий атом +четыре ближайших атома As можно рассматривать как тетраэдрический комплекс, относительно слабо связанный с остальным кристаллом. Пьезоспектроскопические исследования, выполненные авторами, показали, что такие комплексы подвержены сильному эффекту Яна-Теллера за счет взаимодействия связанных дырок с неполносимметричными e-колебаниями тетраэдрического комплекса. В результате в нейтральном состоянии комплексы искажены вдоль направлений [100], и имеется три эквивалентные конфигурации. Примечательно, что при низких температурах наблюдается переориентация таких дефектов. Предложенная модель этих центров позволили объяснить экспериментально наблюдающиеся явления, связанные с особенностями их пространственного и электронного строения, многие из которых обнаружены впервые (анизотропное подавление эффекта Яна-Теллера внешней деформацией, вызывающее в случае CuGa скачкообразное уменьшение ширины и энергетического положения полосы излучения и его сильную поляризацию при деформации вдоль оси [111], рекомбинационно-стимулированная переориентация, «размягчение» кристалла, т. е. уменьшение его упругих постоянных при высокой концентрации центров) и связать изменение свойств при переходе от Cu к Ag и Au с увеличением эффекта Яна-Теллера.

Введение примесей в полупроводник может приводить к возникновению комплексов, содержащих ион примеси и вакансию. Именно такая ситуация реализуется при легировании арсенида галлия теллуrom, когда Te занимает место As и является донором и рядом имеется вакансия на месте Ga. В зависимости от зарядового состояния комплекс в GaAs может связывать одну или две дырки. Такой дефект приводит к уровню в запрещенной зоне, с которыми связана полоса фотолуминесценции при низких температурах. Авторами выполнены эксперименты по поляриза-

ционной- и пьзо-спектроскопии, позволившие установить, что комплекс подвержен эффекту Яна-Теллера, причем величины пространственных искажений различны в поглощающем и излучающем состояниях. Вследствие этого эффективные диполи по-разному ориентированы относительно кристаллографических осей. Показано, что свойства дефекта объясняются в модели излучающего состояния комплекса, полагающей сильный эффект Яна-Теллера, вызванный взаимодействием связанных дырок с е-колебаниями исходно тригонального дефекта. В поглощающем свет состоянии это взаимодействие становится слабее из-за уменьшения в этом состоянии числа дырок, взаимодействующих с е-колебаниями. Следствием этого является сильное уменьшение барьера между эквивалентными конфигурациями комплекса, в результате чего в этом состоянии становится возможной переориентация ян-теллеровских дисторсий, тогда как в излучающем состоянии в отличие от центров Cu, Ag и Au она невозможна. Это приводит к необычному сохранению высокой поляризации, наведенной резонансным поляризованным возбуждением, вплоть до высоких температур при возможности выстраивания дисторсий центра даже при низких температурах в случае одноосного давления.

1. А.А. Гуткин, Н.С. Аверкиев, ФТП, т.51, 10, с. 1299 – 1324 (2017).
2. Н.С. Аверкиев, А.А.Гуткин, ФТТ, т.60, 12, с. 2275 - 2305 (2018).
3. А.А. Гуткин, Н.С.Аверкиев, ФТП, т.56, 11, с. 1021 – 1045 (2022).

ПОВЕРХНОСТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И КВАНТОВЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ В ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ И ПОЛУМЕТАЛЛАХ

В.В. Глушков

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

E-mail: glushkov@lt.gpi.ru

Развитие топологического подхода к анализу квантового эффекта Холла в двумерном (2D) электронном газе [1] привело к открытию нового класса полупроводников – топологических изоляторов (ТИ), в которых поверхностные электронные состояния характеризуются линейным законом дисперсии (дираковским спектром) [2]. В этих соединениях инверсное расположение зон с различной симметрией, формирующих энергетическую щель [2–4], в трехмерном (3D) случае приводит к возникновению поверхностных состояний на границе между ТИ и обычным диэлектриком или вакуумом. Для таких электронных состояний спин и импульс оказываются жестко связаны, что обеспечивает бездиссипативный ток за счет подавления рассеяния носителей заряда на немагнитных дефектах поверхности ТИ. Набор экзотических физических свойств ТИ дополняют топологические полуметаллы (ТП), в частности, дираковские и вейлевские ПМ, в которых соответствующие низкоэнергетические фермионные возбуждения являются прямыми аналогами элементарных частиц в квантовой теории поля [5]. Идентификация механизмов переноса заряда и спина в этих новых квантовых состояниях [2–5] крайне актуальна как для разработки теоретического аппарата, описывающего электронный транспорт в полупроводниках, так и для дальнейшего развития физики конденсированного состояния вещества.

Помимо несомненного фундаментального интереса, изучение электронного транспорта в ТИ и ТП крайне важно для их практического применения. Нарушение временной инвариантности в поверхностном слое 3D ТИ, вызванное внешним магнитным полем, магнитными примесями, напылением на поверхность магнитного материала и др., приводит к росту магнитоэлектрического эффекта [6] и усилению оптических эффектов Фарадея и Керра, важных для создания магнитооптических преобразователей [7]. С другой стороны, ТИ на основе сурьмы и висмута ($\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}$ [8], Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 [9], $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ [10] и др.) традиционно известны как материалы для термоэлектрических преобразователей [11]. В случае топологических полуметаллических фаз нетривиальные поверхностные состояния (в частности, дуги Ферми в дираковских и вейлевских полуметаллах) определяют уникальные электронные и оптические свойства ТП (например, отрицательное магнитосопротивление, индуцированное киральной аномалией [12]).

В докладе представлен краткий обзор проблемы поверхностного электронного транспорта в ТИ и ТП с акцентом на экзотические свойства новых представителей класса топологических материалов – гексаборидов самария SmB_6 , иттербия YbB_6 и европия EuB_6 [13–16]. В случае SmB_6 и

YbV₆ показано влияние специальной обработки поверхности на параметры электронного транспорта в коррелированных ТИ для поверхностей, отвечающих различным кристаллографическим плоскостям. Для SmV₆ впервые выявлена зависимость эффективных параметров поверхностных носителей заряда от морфологии исследуемой поверхности, определяемой как ее ориентацией, так и способом ее обработки. В частности, травление полированных полярных граней SmV₆ (100) инициирует уменьшение концентрации и рост подвижности поверхностных носителей заряда *n*-типа при 1,9 К до значений $0,76/a^2$ ($a = 4,134 \text{ \AA}$) и $18 \text{ см}^2/(\text{Вс})$, соответственно, в то время как после травления неполярных поверхностей (110) и (111) SmV₆ концентрации поверхностных носителей заряда превышают предельное значение, рассчитанное из размера поверхностной зоны Бриллюэна, в 2,3 и 3,9 раза, соответственно. Указанный параметр предложено использовать в качестве простого экспериментального критерия топологической природы поверхностного электронного транспорта в ТИ [14].

В случае YbV₆ вклад поверхностной проводимости наблюдается во всем исследуемом диапазоне температур и практически не зависит от морфологии и способа подготовки поверхности (полировки и химического травления). Из анализа данных холловского сопротивления при $T > 10 \text{ К}$ получены оценки подвижности поверхностных носителей заряда *n*-типа ($\sim 1000 \text{ см}^2/(\text{Вс})$) и их концентрации $(2,6 \pm 0,85)/a^2$ (параметр решетки YbV₆ $a = 4,179 \text{ \AA}$). При $T < 10 \text{ К}$ впервые идентифицирован вклад носителей заряда *p*-типа с аномально высокими для данного класса соединений холловскими подвижностями, достигающими при 1,8 К значений $\sim 4 \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{Вс})$.

Особенности квантовых осцилляций рассмотрены на примере ферромагнитного полуметалла EuV₆ с эффектом колоссального магнитосопротивления, для которого предсказана реализация перехода к состоянию вейлевского полуметалла в магнитном поле вдоль направления $\langle 111 \rangle$ [18]. Показано, что квантовые осцилляции Шубникова – де Гааза проявляются на полевых зависимостях удельного сопротивления в магнитном поле выше 2,5 Тл при температурах ниже 10 К. Для магнитного поля $\mathbf{B} \parallel \langle 100 \rangle$ из частоты осцилляций 29,4 Тл оценены площадь сечения поверхности Ферми $S \approx 2,78 \cdot 10^{11} \text{ см}^2$ и величина волнового вектора $k_f \approx 2,97 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$. отвечающие концентрации электронов $n_0 \approx 1,33 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в приближении изотропной поверхности Ферми с учетом трехкратного вырождения зоны проводимости в точках X зоны Бриллюэна. Оценки параметров носителей заряда – эффективной массы $m_{\text{eff}} \approx 0,19m_0$ (m_0 – масса электрона), подвижности $\mu \approx 1700 \text{ см}^2/(\text{Вс})$ и времени релаксации $\tau \approx 0,2 \text{ пс}$ – позволяют сопоставить их с подзоной электронов со спинами, поляризованными противоположно направлению магнитного поля ($n_{\downarrow} = n_0$), а значения холловской концентрации $n_H \approx 3,57 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ дают оценки концентрации электронов с поляризованным по полю спином $n_{\uparrow} = n_H - n_{\downarrow} \approx 3,44 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и энергии обменного взаимодействия $J \approx 70 \text{ мэВ}$. При этом степень

спиновой поляризации $P = (n_{\uparrow} - n_{\downarrow})/n_H \approx 92\%$ недостаточна для реализации полностью спин-поляризованного (half-metallic) состояния в ферромагнитной фазе EuV_6 . В заключительной части доклада обсуждается возможная связь аномалий параметров квантовых осцилляций, обнаруженных для направления магнитного поля $\langle 111 \rangle$, с предсказываемым в [18] переходом к состоянию вейлевского полуметалла.

Работа выполнена в рамках гранта РФФ 22-22-00990.

1. X.G. Wen, *Advances in Physics* **44**, 405 (1995).
2. L. Fu, C. L. Kane, E. J. Mele, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 106803 (2007).
3. M.Z. Hasan, C.L. Kane, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 3045 (2010).
4. Y. Ando, *J. Phys. Soc. Japan* **82**, 102001 (2013).
5. B. Q. Lv, T. Qian, H. Ding, *Rev. Mod. Phys.* **93**, 025002 (2021).
6. A. Essin, J. Moore, D. Vanderbilt, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 146805 (2009).
7. W.-K. Tse, A. H. MacDonald, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 057401 (2010).
8. D. Hsieh et al., *Nature* **452**, 970 (2008).
9. H. Zhang et al., *Nature Phys.* **5**, 438 (2009).
10. Zhi Ren et al., *Phys. Rev. B* **82**, 241306 (2010).
11. G.J. Snyder, E.S. Toberer, *Nature Mater.* **7**, 105 (2008).
12. Xiaochun Huang et al., *Phys. Rev. X* **5**, 031023 (2015).
13. V. Glushkov et al., *phys. stat. sol. – Rapid Res. Lett.* **10**, 320 (2016).
14. В. Глушков и др., *Письма в ЖЭТФ* **116**, 770 (2022).
15. V. Glushkov et al., *Solid State Sciences* **142**, 107247 (2023).
16. M. Anisimov et al., *Solid State Sciences* **142**, 107233 (2023).
17. M. Anisimov et al., *Solid State Sciences* **152**, 107546 (2024).
18. Simin Nie et al., *Phys. Rev. Lett.* **124** 076403 (2020).

ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕРМАЛИЗАЦИЯ И КРИТИЧЕСКОЕ ЗАМЕДЛЕНИЕ В ДВУХФОТОННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ

В.Ю. МЫЛЬНИКОВ¹, С.О. ПОТАШИН¹, М.С. УКХТАРИ², Ч.А. ДОУИНГ²,
Г.С. СОКОЛОВСКИЙ¹, Н.С. АВЕРКИЕВ¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

²Эксетерский университет, Эксетер, Великобритания

E-mail: vm@mail.ioffe.ru

В последние годы диссипативные фазовые переходы (ДФП) вызывают большой интерес в квантовой оптике [1]. Такие фазовые переходы характеризуются резким изменением физических наблюдаемых при варьировании параметров системы, например, различных констант связи или темпа накачки и диссипации. Причиной растущего интереса к ДФП является быстрое развитие новой области исследований, связанной с резонаторной квантовой электродинамикой, в рамках которой можно создавать большое разнообразие управляемых неравновесных квантовых систем. В настоящем исследовании рассматривается микроволновый резонатор с двухфотонной накачкой и двухфотонной диссипацией как один из ярких примеров в неравновесных квантовых системах (Рис. 1а). Данная система экспериментально реализована [3-4], и может быть использована для универсальных квантовых вычислений [2] в качестве фотонного кубитана квантовых состояниях кота Шрёдингера.

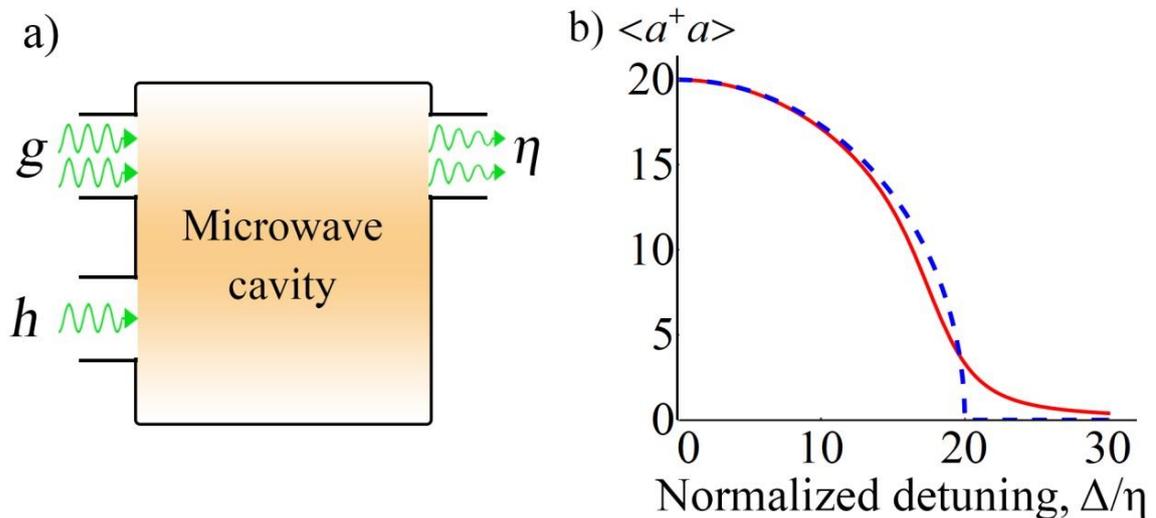


Рис. 1. (а) Экспериментальная схема микроволнового резонатора с двухфотонной накачкой со скоростью g , однофотонной накачкой со скоростью h и двухфотонной диссипацией со скоростью η . Зависимость среднего числа фотонов $\langle a^\dagger a \rangle$ от нормированного частотного рассогласования Δ/η . Нормированная скорость двухфотонной накачки и скорость двухфотонной диссипации были равны $g/\eta=20$ и $\eta=1$, соответственно. Квазиклассическое приближение соответствует синей пунктирной линии, а численный расчет дается красной линией.

Для описания ДФП в квантовых неравновесных системах зачастую используется полуклассическое приближение, пренебрегающее квантовыми флуктуациями. Однако, выход за рамки полуклассической теории является крайне сложной задачей, для решения которой необходимо

одновременно учитывать квантовые и диссипативные особенности неравновесной системы. Проблема описания квантовых флуктуаций может быть сильно упрощена, если доказана справедливость теории Ландау, которая широко используется в статистической физике для описания термодинамических фазовых переходов.

В данной работе было показано, что области вблизи критической точки неравновесный ДФП (Рис. 1b) в микроволновом резонаторе с двухфотонной накачкой и двухфотонной диссипацией можно свести к задаче о нелинейном классическом осцилляторе с шумом. Это факт позволил нарисовать критическую область вблизи точки фазового перехода, где становится неприменима полуклассическая теория из-за наличия сильных квантовых флуктуаций. Чтобы выйти за рамки полуклассической теории, мы использовали уравнение Фоккера-Планка на усеченную функцию Вигнера. Данная процедура эквивалентна добавлению шумовых слагаемых в квазиклассические уравнения движения системы. Полученный подход позволяет учесть квантовые флуктуации и описать ДФП вблизи критической точки. Нами было показано, что исследуемая неравновесная квантовая система может быть описана методами статистической физики, так как функция Вигнера имеет вид распределения Больцмана с эффективной температурой и термодинамическим потенциалом. Таким образом, одним из ключевых результатов данного исследования является обоснование теории Ландау для рассматриваемого ДФП.

Подобно термодинамическому фазовому переходу, флуктуации числа частиц в нашей системе возрастают вблизи критической точки [6]. В результате появляется критическая область, где теория Ландау перестает быть применимой. Чтобы обойти данную проблему, мы используем полученное уравнение Фоккера-Планка и рассчитываем функцию распределения в критической точке. Это позволяет нам определить среднее число фотонов в зависимости от скорости двухфотонной накачки и диссипации и рассчитать критические экспоненты. Кроме того, мы исследуем критическое замедление временной динамики диссипативного фазового перехода вблизи критической точки как аналитически, так и численно, рассчитывая спектральную плотность оператора Лиувилля [7]. Мы также изучили отклик системы на слабую однофотонную накачку и обнаружили аналог классического закона Кюри в рассматриваемой квантовой неравновесной системе.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 21-72-30020).

1. E. M. Kessler, et al. *Phys. Rev. A* **86**, 012116 (2012).
2. M. Mirrahimi, et al. *New J. Phys.* **16**, 45014 (2014).
3. Z. Leghtas, et al. Confining the state of light to a quantum manifold by engineered two-photon loss. *Sci.* **347**, 853–857 (2015).

4. C. Berdou, *et al.* One Hundred-Second Bit-Flip Time in a Two-Photon Dissipative Oscillator. *PRX Quantum***4**, 20350 (2023).
5. N. Bartolo et al., *Phys. Rev. A* **94**, 033841 (2016).
6. V. Yu. Mylnikov et al., *Nanomaterials* **12**, 2543 (2022).
7. F. Minganti et al., *Phys. Rev. A***98**, (2018).

КРЕМНИЕВЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРЫ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ ИЗ ОКСИДА СКАНДИЯ

А.М. Гурьянов¹, С.А. Гурьянов²

¹*Самарский государственный технический университет, Самара*

²*Московский государственный технический университет*

им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: gurjanovam@mail.ru

Оксид скандия можно отнести к альтернативным диэлектрикам, диэлектрикам с высокой диэлектрической проницаемостью – high-*k* dielectrics. В данной работе рассматривались диэлектрические пленки оксида скандия толщиной 20–100 нм, нанесенные на кремниевые подложки. Определялись свойства как самих диэлектрических пленок оксида скандия, так и свойства МДП-структур с диэлектрическими слоями из оксида скандия.

Методами отражательной эллипсометрии определялись оптические параметры пленок (толщина, показатель преломления). Установленной моделью отражающей поверхности структуры пленка оксида скандия – кремниевая подложка является модель однородной прозрачной пленки на поглощающей подложке с двумя переходными слоями, одним из которых является поверхностный слой двуокиси кремния. В рамках установленной модели по измеренным эллипсометрическим углам рассчитывались оптические параметры (показатель преломления и толщина) пленок, а также параметры переходных слоев на границе диэлектрик-полупроводник, которые использовались при определении электрофизических характеристик МДП-структур. В рассмотренных структурах показатель преломления пленок оксида скандия оказался равным 1,94.

Установлено, что электропроводность исследуемых диэлектрических пленок, определяемая по вольтамперным характеристикам МДП-структур, описывается механизмом Пула-Френкеля. Из измеренных высокочастотных вольт-фарадных характеристик рассчитывались удельная емкость диэлектрического слоя, коэффициент перекрытия по емкости, величина управляющего напряжения, поверхностная плотность встроенного заряда в диэлектрике, эффективная плотность при потенциале плоских зон. Показано, что наличие переходных слоев на межфазной границе диэлектрик-полупроводник приводит к уменьшению удельной емкости МДП-структур и увеличению поверхностной плотности встроенного заряда в диэлектрике и эффективной плотности поверхностных состояний. Используя данные о параметрах пленок и переходных слоев на границе диэлектрик-полупроводник, для диэлектрической проницаемости пленок оксида скандия в рассматриваемых МДП-структурах получено значение равное 15.

МЕЖДОЛИННОЕ СМЕШИВАНИЕ И ЭКСИТОНЫ В НАНОСТРУКТУРАХ ИЗ ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА

И.Д. Авдеев¹, М.О. Нестоклон¹, С.В. Гупалов^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

²Jackson State University, Jackson, Mississippi, USA

E-mail: ivan.avdeev@mail.ioffe.ru

Наноструктуры из халькогенидов свинца, PbX, X=S, Se, Te имеют широкие возможности для применения в различных областях науки и техники. На их основе могут создаваться эффективные оптоэлектронные приборы, такие как солнечные панели, фотодиоды и излучатели, работающие в инфракрасной (телекоммуникационной) области спектра [1]. Также они имеют перспективы применения и в квантовых системах, выступая в качестве источников одиночных фотонов [2] или платформы для реализации майорановских фермионов [3]. Не смотря на превосходные физические свойства, теоретическое описание наноструктур из халькогенидов свинца существенно осложняется их сложной многодолинной зонной структурой, экстремумы которой расположены в четырех неэквивалентных L долинах, состояния из которых могут смешиваться за счет рассеяния на поверхности наноструктуры.

Для решения этой проблемы нашей группой была сделана серия работ [4–6], в которых была построена аккуратная обобщенная теория, позволяющая учесть эффекты долинного смешивания в наноструктурах из PbX. В основе теории лежит комбинация атомистического метода сильной связи, теории групп и расширенной для учета комбинаций долинных состояний кр модели. Основное внимание в этих работах уделено квантовым точкам из PbS и PbSe, однако разработанные методы и подходы применимы и к нанопроволокам, и квантовым ямам/нанопластинам из PbX и других многодолинных полупроводниковых материалов.

В докладе будут кратко изложены основные методы, позволяющие учесть междолинное смешивание в гамильтониане наноструктуры и численно рассчитать его параметры. Также будет проанализировано влияние междолинного смешивания и связанного с ним долинного расщепления на g-факторы основных уровней электронов и дырок и тонкую структуру основного экситонного уровня в квантовых точках из PbS и PbSe с различной формой поверхности и точечной симметрией.

Работа поддержана грантом РФФИ №23-12-00142.

1. L. Gao *et al.*, Nat. Photon. **14**, 4, 227 (2020),
2. S. Krishnamurthy *et al.*, ACS Nano 2021, **15**, 1, 575 (2020),
3. W. Song *et al.*, Phys. Rev. B **108**, 045426 (2023)
4. IDA, MON, SVG, Nano Lett. **20**, 12, 8897, (2020),
5. IDA, SVG, MON, Phys. Rev. B **107**, 035414 (2023),
6. IDA, MON, JETP, Vol. **166**, No 8 (2024).

АНИЗОТРОПНЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОЛЯРИТОНЫ В ОДНООСНЫХ СРЕДАХ

К.Ю. Голеницкий

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: golenitski.k@mail.ioffe.ru

Поляритон является результатом взаимодействия света с возбуждениями в материале, например с фононами, с плазмонами, с экситонами. Поверхностными поляритонами называют особые решения уравнений Максвелла в форме волны, распространяющейся вдоль свободной границы кристалла или вдоль границы между кристаллом и другой средой, и локализованной на этой границе. Таким образом энергия возбуждения сосредоточена около границы на расстояниях порядка единиц длин волн и переносится вдоль неё на расстояния значительно большие, чем длина волны.

Наиболее изученный и часто приводимый в литературе пример поверхностного поляритона — поверхностный плазмон(-поляритон) [1]. Он существует на границе металла с изотропной однородной диэлектрической средой, в простейшем случае с вакуумом. Одно из условий существования поверхностного поляритона на границе двух изотропных однородных сред требует, чтобы диэлектрические проницаемости контактирующих материалов были разного знака на выбранной частоте. Достигнуть этого можно не только в металлах до плазменной частоты, но и, например, в области остаточных лучей (Reststrahlen band) полярных кристаллов. В последнем случае говорят уже о поверхностных фонон-поляритонах. Существование обоих типов поверхностных поляритонов было неоднократно подтверждено экспериментально.

Анализ поверхностных поляритонов в анизотропной однородной среде существенно усложняется. В первую очередь это связано с явлением двулучепреломления, возникающим из-за смешивания собственных волн граничными условиями. Первые исследования поверхностных поляритонов в анизотропных средах отталкивались от условий существования поляритонов в изотропной среде. Поэтому какое-то время была распространена неверная идея о том, что условие отрицательности диэлектрической проницаемости является необходимым и в случае анизотропных сред. Однако, в работе 1988 года [2] М.И. Дьяконов теоретически предсказал существование поверхностной волны на границе положительного одноосного диэлектрического кристалла и изотропного диэлектрика. Сейчас она называется его именем — *поверхностная волна Дьяконова*. Принципиальное отличие от предыдущих двух поляритонов состоит в том, что волны Дьяконова – бездисперсионные, незатухающие и распространяются в ограниченном диапазоне углов в плоскости границы. Первые два свойства связаны со слабой частотной дисперсией и отсутствием поглощения в диэлектриках. Последнее определяется

величиной анизотропии одноосного кристалла. Первое экспериментальное подтверждение существования волн Дьяконова было получено спустя 30 лет в работе [3] для кристалла KTiOPO_4 (КТР).

В докладе будет приведён обзор поверхностных поляритонов, которые могут существовать на границе однородной одноосной и изотропной среды, их основных свойств и особенностей. Уже в простом случае, когда оптическая ось одноосной среды параллельна границе, имеется большое многообразие поверхностных поляритонов: *эллиптические и гиперболические плазмон- или фонон-поляритоны, волны Дьяконова, дьяконовские плазмоны*. В отличие от случая изотропных сред волновой вектор поверхностного поляритона зависит от направления распространения в плоскости границы. В определённых случаях это приводит к ограниченному диапазону углов распространения, как например для волн Дьяконова. При учёте частотной дисперсии диэлектрической проницаемости изменяется не только величина волнового вектора поверхностного поляритона, но и диапазон углов распространения. Эти особенности удобно анализировать с помощью изочастотного контура поверхностного поляритона. Названия эллиптический или гиперболический поляритон отражают суть формы изочастотного контура соответствующего поляритона. Более подробный анализ и решение в аналитической форме для произвольного соотношения между диэлектрическими проницаемостями сред приведён в работе [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №22-12-00139).

1. J.M. Pitarke et al., Rep. Prog. Phys. **70**, 1 (2007).
2. М.И. Дьяконов, ЖЭТФ **4**, 119 (1988).
3. О. Takayama et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 043903 (2009).
4. К. Yu. Golenitskii, preprint arXiv:2402.05537 (2024).

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА МАССИВОВ НАНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ГАЛЛИЯ

А.А. Ревин, А.А. Конаков, Д.С. Королев

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

E-mail: revinalexandre@yandex.ru

Интерес к исследованиям оксида галлия растет последнее десятилетие в связи с перспективой построения детекторов УФ-излучения, приборов силовой электроники, газовых датчиков. Рост объемного материала сопряжен со многими трудностями [1]. Одним из решений этой проблемы является формирование нановключений оксида галлия методом ионной имплантации [2].

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию электронной структуры нановключений оксида галлия в матрицах широкозонных диэлектриков: в первую очередь диоксида кремния.

В приближении огибающей рассчитываются энергии и волновые функции электронов и дырок уединенного нанокристалла в зависимости от его размера. Показано, что приближение сильной связи является хорошим приближением для описания структуры низкоэнергетических квази-частичных состояний массивов нанокристаллов. Состояния электронов с энергиями больше разрыва зон проводимости рассчитывались в приближении почти свободных электронов.

Так же рассчитывается электронная структура нанокристалла оксида галлия, легированного мелким донором. Эта задача может быть важной не только из-за возможного намеренного легирования, но и из-за неизбежного формирования примесей, приходящих из матрицы, что может делать, например, кремний. Показано, что мелкие доноры в крупном нанокристалле образуют компактную нейтральную систему.

Были рассчитаны подвижности электронов в приближении почти свободных электронов при учете рассеяния на флуктуациях размера и положения нанокристаллов.

Показано, что как эффекты размерного квантования в чистых нанокристаллах, так и водородоподобные доноры слабо влияют на ширину оптической щели, что делает массивы нановключений оксида галлия перспективными для построения детекторов УФ излучения.

Работа была выполнена при поддержке министерства науки и высшего образования РФ (госзадание FSWR-2023-0035)

1. C. Wang et al, J. Phys. D. Appl. Phys., 54, 243001 (2021),
2. D.S Korolev et al., Nanomaterials, .12, 1840 (2022).

Electronic phenomena
in nanostructures

EFFECTIVE THERMALIZATION AND CRITICAL SLOWING DOWN IN TWO-PHOTON DISSIPATIVE QUANTUM SYSTEMS

V.Yu. Mylnikov¹, S.O. Potashin¹, M.S. Ukhtary², C.A. Downing²,
G.S. Sokolovskii¹, N.S. Averkiev¹

¹ *Ioffe Institute, St. Petersburg*

² *University of Exeter, Exeter, UK*

E-mail: vm@mail.ioffe.ru

In recent years, the fields of physics and quantum optics are very interested in dissipative phase transitions (DPT) [1]. Abrupt changes in the physical observables of the system's parameters, including coupling constants, driving rates, and dissipation, are essentially identify it. The reason behind growing interest in the DPT is the substantial advancement of a recently established field of quantum optical studies called cavity quantum electrodynamics, which makes it possible to create a large variety of controlled nonequilibrium quantum systems. We will examine an microwave oscillator with two-photon driving and two-photon dissipation as a prominent example of such a system in the present study (Fig 1a). The qubit platform, which is beneficial for universal quantum computation [2] and is based on quantum Schrödinger cat states, is the direct practical implementation of such a model [3-4]. Beyond the mean-field description, such a system becomes extremely complex to examine due to its quantum and dissipative characteristics. In statistical physics, one can apply the Landau theory, which is utilized for a wide range of equilibrium systems. However, the common framework for investigation of the DPT is currently absent.

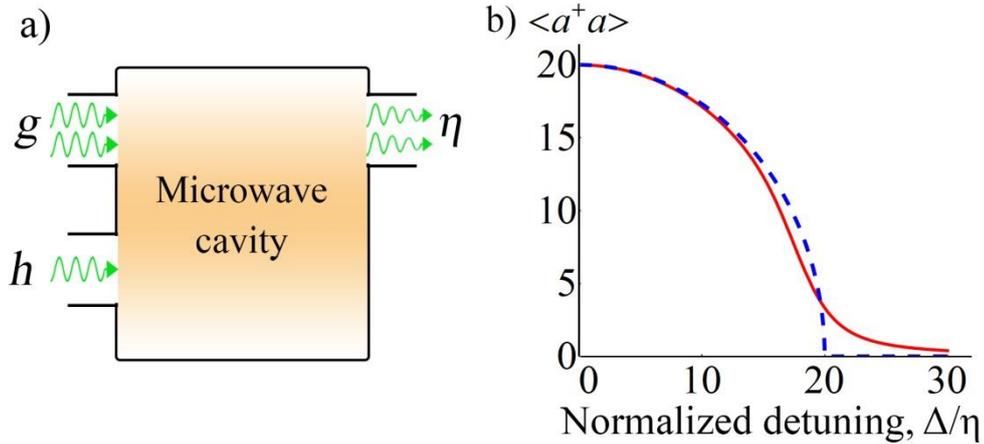


Fig. 1. (a) A schematic of the photon microwave cavity with two-photon pump at g rate, one-photon pump at h rate and two-photon dissipation at η rate. (b) Average number of photons $n = \langle a^\dagger a \rangle$ vs the normalized frequency detuning Δ/η . The normalized two-photon pump rate and two-photon dissipation rate are set to $g/\eta=20$ and $\eta=1$, correspondingly. Blue dashed line represents semiclassical approximation, while red line shows the numerical calculation.

Here, we systematically demonstrate that, at regions near the critical point, the nonequilibrium DPT that observed in the microwave oscillator with two-photon drive and two-photon dissipation (Fig. 1b) may be projected onto a

nonlinear classical oscillator with noise. Additionally, we describe the quantum critical area close to the critical point, where significant quantum fluctuations ruin mean-field treatment. To do this, we use the truncated Wigner approximation in this paper, which allows us to improve the semiclassical equations derived earlier [5]. As a result, we obtain the Langevin and Fokker-Planck equations, which describe the Wigner distribution function and allow us to take into account the critical quantum fluctuations of the system.

We show how the well-known ideas of the statistical physics appear in the explored nonequilibrium system and lead to emergent equilibrium in the vicinity of the critical point. In order to do this, we proved that the distribution function takes on the shape of a Boltzmann distribution that depends on the effective temperature and potential. Thus, one of the key results of this research is the justification of the Landau theory for the DPT under consideration.

Similar to a thermodynamic phase transition, fluctuations increase close to the critical point [6]. As a result, a critical area appears where the Landau theory no longer holds true. To get over this issue, we use the Fokker-Planck equation and immediately calculate the distribution function at the critical point. This lets us determine the average number of photons as a function of drive and dissipation rates and the associated critical exponent. Furthermore, we investigate the critical slowing down near the critical point of dissipative phase transition both analytically and numerically, focusing on the calculation of the Liouvillian spectral gap [7]. We also investigate the response of the system on the weak one-photon drive and find the analog of the classical Curie's law.

This research was supported by RSF (project No. 21-72-30020).

1. E. M. Kessler, et al., *Phys. Rev. A* **86**, 012116 (2012).
2. M. Mirrahimi, et al., *New J. Phys.* **16**, 45014 (2014).
3. Z. Leghtas, et al., Confining the state of light to a quantum manifold by engineered two-photon loss. *Sci.* **347**, 853–857 (2015).
4. C. Berdou, et al., One Hundred Second Bit-Flip Time in a Two-Photon Dissipative Oscillator. *PRX Quantum* **4**, 20350 (2023).
5. N. Bartolo et al., *Phys. Rev. A* **94**, 033841 (2016).
6. V. Yu. Mylnikov et al., *Nanomaterials* **12**, 2543 (2022).
7. F. Minganti et al., *Phys. Rev. A* **98**, (2018).

SILICON FILM MICRO- AND NANOSTRUCTURES WITH DIELECTRIC LAYERS OF SCANDIUM OXIDE

A.M. Guryanov¹, S.A. Guryanov²

¹ *Samara State Technical University, Samara*

² *Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

E-mail: gurjanovam@mail.ru

Scandium oxide can be classified as an alternative dielectric, dielectric with high dielectric constant - high-k dielectrics. In this work, dielectric films of scandium oxide with a thickness of 20–100 nm deposited on silicon substrates were considered. The properties of both the dielectric scandium oxide films themselves and the properties of MIS-structures with dielectric layers of scandium oxide were determined.

The optical parameters of the films (thickness, refractive index) were determined using reflective ellipsometry methods. The established model of the reflective surface of the scandium oxide film–silicon substrate structure is the model of a homogeneous transparent film on an absorbing substrate with two transition layers, one of which is the surface layer of silicon dioxide. Within the framework of the established model, the optical parameters (refractive index and thickness) of the films were calculated from the measured ellipsometric angles, as well as the parameters of the transition layers at the dielectric-semiconductor interface, which were used to determine the electrical characteristics of MIS-structures. In the structures considered, the refractive index of scandium oxide films turned out to be 1.94.

It has been established that the electrical conductivity of the dielectric films under study, determined from the current-voltage characteristics of MIS-structures, is described by the Poole-Frenkel mechanism. From the measured high-frequency capacitance-voltage characteristics, the specific capacitance of the dielectric layer, the capacitance overlap coefficient, the value of the control voltage, the surface density of the built-in charge in the dielectric, and the effective density at the potential of flat zones were calculated. It is shown that the presence of transition layers at the dielectric-semiconductor interface leads to a decrease in the specific capacitance of MIS-structures and an increase in the surface density of the built-in charge in the dielectric and the effective density of surface states. Using data on the parameters of films and transition layers at the dielectric-semiconductor interface, a value of 15 was obtained for the dielectric constant of scandium oxide films in the MIS-structures under consideration.

INTERVALLEY MIXING AND EXCITONS IN LEAD CHALCOGENIDE NANOSTRUCTURES

I.D. Avdeev^{1,2}, M.O. Nestoklon¹, S.V. Goupalov^{1,2}

¹*Ioffe Institute, St. Petersburg*

²*Jackson State University, Jackson, Mississippi, USA*

E-mail: ivan.avdeev@mail.ioffe.ru

Lead chalcogenides nanostructures, PbX, X=S, Se, Te, offer extensive potential for applications in various fields of science and technology. These materials can be used to create efficient optoelectronic devices such as solar cells, photodiodes and emitters operating in the infrared (telecommunication) spectral range [1]. They are also promising candidates for use in quantum systems as single-photon sources [2] or as a platform for realization of Majorana fermions [3]. Despite their excellent physical properties, theoretical description of lead chalcogenides nanostructures is significantly complicated by their complex multi-valley band structure. The band extrema in PbX are located in four nonequivalent L valleys, which states can mix due to the intervalley scattering at the surface of the nanostructure.

To address this issue, our group has conducted a series of studies [4–6], developing a comprehensive generalized theory that accounts for the valley mixing of states in PbX nanostructures. Our theory is based on a combination of the atomistic tight-binding method, group theory, and extended kp model. The primary focus of these studies is on quantum dots of PbS and PbSe, although the developed methods and approaches are also applicable to nanowires, quantum wells, and nanosheets of PbX and other multi-valley semiconductor materials.

The presentation will briefly outline how to incorporate the valley mixing into the Hamiltonian of the nanostructure and how to compute its parameters. Additionally, the impact of the valley mixing and the associated valley splitting on the g-factors of the ground electron and hole levels, as well as the fine structure of the ground exciton in PbS and PbSe quantum dots with various surface shapes and point symmetries, will be analyzed.

This work is supported by the RSF grant No. 23-12-00142.

1. L. Gao *et al.*, Nat. Photon. **14**, 4, 227 (2020).
2. S. Krishnamurthy *et al.*, ACS Nano 2021, **15**, 1, 575 (2020).
3. W. Song *et al.*, Phys. Rev. B **108**, 045426 (2023).
4. IDA, MON, SVG, Nano Lett. **20**, 12, 8897 (2020).
5. IDA, SVG, MON, Phys. Rev. B **107**, 035414 (2023).
6. IDA, MON, JETP, Vol. **166**, No 8 (2024).

ANISOTROPIC SURFACE POLARITONS IN UNIAXIAL MEDIA

K.Yu. Golenitskii

Ioffe Institute, Saint-Petersburg
E-mail: golenitski.k@mail.ioffe.ru

Polariton is the result of the interaction of light with excitations in a media, for example with phonons, with plasmons, with excitons and so on. Surface polaritons are special solutions of Maxwell's equations in the form of a wave propagating along the free boundary of a crystal or along the boundary between a crystal and another medium, and localized at this boundary. Thus, the excitation energy is concentrated near the boundary at distances of the order of several wavelengths and is transferred along it to distances significantly greater than the wavelength.

The most studied and often cited example of a surface polariton in the literature is the surface plasmon(-polariton) [1]. It exists at the boundary of a metal with an isotropic homogeneous dielectric medium, in the simplest case with a vacuum. One of the conditions for the existence of a surface polariton at the boundary of two isotropic homogeneous media requires that the dielectric constants of the contacting materials be of different signs at the selected frequency. This can be achieved not only in metals up to the plasma frequency, but also, for example, in the region of residual rays (Reststrahlen band) of polar crystals. In the latter case, one already speaks of surface phonon-polaritons. The existence of both types of surface polaritons has been repeatedly confirmed experimentally.

The analysis of surface polaritons in an anisotropic homogeneous medium becomes significantly more complicated. This is primarily due to the phenomenon of birefringence, which arises due to the mixing of natural waves by boundary conditions. The first studies of surface polaritons in anisotropic media were based on the conditions for the existence of polaritons in an isotropic medium. Therefore, for some time there was a widespread incorrect idea that the condition of negative dielectric constant is also necessary in the case of anisotropic media. However, M.I. Dyakonov theoretically predicted the existence of a surface wave at the interface of a positive uniaxial dielectric crystal and an isotropic dielectric in work [2] dated 1988. Now it is called after him *Dyakonov surface wave*. The fundamental difference from the previous two polaritons is that Dyakonov waves are non-dispersive, without absorption, and propagate in a limited range of angles in the boundary plane. The first two properties are associated with weak frequency dispersion and the absence of absorption in dielectrics. The latter is determined by the strength of the anisotropy of the uniaxial crystal. The first experimental confirmation of the existence of Dyakonov waves was obtained 30 years later in [3] for the KTiOPO_4 (KTP) crystal.

The report will provide an overview of surface polaritons that can exist at the boundary of a homogeneous uniaxial and isotropic medium, their main properties and features. Already in the simple case, when the optical axis of a

uniaxial medium is parallel to the boundary, there is a large variety of surface polaritons: *elliptical* and *hyperbolic plasmon* or *phonon polaritons*, *Dyakonov waves*, *Dyakonov plasmons*. In contrast to the case of isotropic media, the wave vector of the surface polariton depends on the direction of propagation in the plane of the boundary. In certain cases, this leads to a limited range of propagation angles, such as for Dyakonov waves. When taking into account the frequency dispersion of the dielectric constant, not only the magnitude of the wave vector of the surface polariton changes, but also the range of propagation angles. These features can be conveniently analyzed using the isofrequency contour of the surface polariton. The names elliptical or hyperbolic polariton reflect the essence of the shape of the isofrequency contour of the corresponding polariton. A more detailed analysis and solution in analytical form for an arbitrary relationship between the dielectric constants of media is given in [4].

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 22-12-00139).

1. J.M. Pitarke et al., Rep. Prog. Phys. **70**, 1 (2007).
2. М.И. Дьяконов, ЖЭТФ **4**, 119 (1988).
3. O. Takayama et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 043903 (2009).
4. K.Yu. Golenitskii, preprint arXiv:2402.05537 (2024).

ELECTRONIC STRUCTURE AND TRANSPORT PROPERTIES OF ARRAYS OF GALLIUM OXIDE NANOCRYSTALS

A.A. Revin, A.A. Konakov, D.S. Korolev

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod

E-mail: revinalexandre@yandex.ru

Interest in gallium oxide research has been growing over the past decade due to the prospect of building UV radiation detectors, power electronics devices, and gas sensors. The growth of bulk material is associated with many difficulties [1]. One of the solutions to this problem is the formation of gallium oxide nano inclusions by ion implantation [2].

This work is devoted to the theoretical study of the electronic structure of gallium oxide nano inclusions in matrices of wide-band dielectrics: primarily silicon dioxide.

In the envelope function approximation, the energies and wave functions of electrons and holes of isolated nanocrystal are calculated depending on its size. It is shown that the tight-binding approximation is a good approximation for describing the structure of low-energy quasi-particle states of nanocrystals arrays. The states of electrons with energies greater than offset of the conduction bands were calculated in the approximation of almost free electrons.

The electronic structure of a gallium oxide nanocrystal doped with a shallow donor is also calculated. This task may be important not only because of the possible intentional alloying, but also because of the inevitable formation of impurities coming from the matrix, which, for example, silicon can do. It is shown that shallow donors in a large nanocrystal form a compact neutral system.

Electron mobility's were calculated in the approximation of almost free electrons, taking into account scattering by fluctuations in the size and position of nanocrystals.

It is shown that both the effects of size quantization in pure nanocrystals and hydrogen-like donors have a weak effect on the width of the optical slit, which makes arrays of gallium oxide nano inclusions promising for the construction of UV radiation detectors.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment FSWR-2023-0035).

1. C. Wang et al, J. Phys. D. Appl. Phys., 54, 243001 (2021).
2. D.S Korolev et al., Nanomaterials, .12, 1840 (2022).

Индустриальная фотоника

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ОТОБРАЖЕНИЯ ЛУЧЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ ОПТИКИ

А.О. Вознесенская, Я.В. Терло, А.В. Бахолдин
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
E-mail: voznensenskaya@itmo.ru

Современные технологии разработки систем индустриальной фотоники требуют достижения дифракционного качества формируемого изображения и в то же время обеспечения компактности оптических интерфейсов за счет минимизации числа элементов. Применение новой элементной базы, основанной на оптике свободной формы (*freeform*), позволяет достичь данных требований. Следует отметить, что применение *freeform*-оптики в последнее десятилетие значительно расширилось, благодаря появлению широкого ассортимента высококачественных оптических полимеров, высокоточного оборудования для формирования сложных профилей поверхностей, развитию математического аппарата и совершенствованию вычислительных мощностей.

В результате изучения методов синтеза *freeform*-оптики выявлено, что большинство из них предназначено для разработки осветительных систем и не учитывают критерии качества изображения [1]. В частности, нетривиальной задачей математического моделирования *freeform*-оптики является корректное описание преобразования входного и выходного волновых фронтов с соблюдением допустимых искажений, описываемых функцией волновой аберрации, а также учета значительного количества ограничений, связанных с геометрическими параметрами оптических поверхностей свободной формы [2]. Кроме того, для подобных обратных методов расчета оптики особая сложность заключается в определении «стартовой точки» оптической системы.

Модификация метода геометрического отображения лучей (*ray-mapping method*) позволила разработать алгоритмы расчета *freeform*-оптики для изображающих задач. Предложенный подход основан на сопряжении конгруэнций входного и выходного волновых фронтов, обратной трассировке лучей, определении набора точек искомой *freeform*-поверхности, последующей ее аппроксимации и верификации [2, 3].

В работе представлены разработанные алгоритмы расчета и результаты моделирования рефракционной и зеркальной *freeform*-оптики для космических систем, коллиматоров и устройств дополненной реальности, а также показаны наиболее эффективные способы описания полученных *freeform*-поверхностей и их последующей интеграции в стандартные пакеты программ.

1. J.P. Rolland, M.A. Davies, T.J. Suleski, et al., *Optica*. **8**. 161-176 (2021).
2. Y.V. Mazur, A.O. Voznesenskaya, *J. Opt. Technol.* **89**. 89-93 (2022).
3. Y.V. Terlo, A.O. Voznesenskaya, *J. Opt. Technol.* **90**, 242-248 (2023).

О ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

И.В. Фролов

ООО «Сарансккабель-Оптика», Саранск

E-mail: frolov@sarko.ru

Общепринято определение погрешности измерения коэффициента затухания оптических волокон (ОВ) методом обратного рэлеевского рассеяния на участках ОВ средней протяженности (десятки километров), с указанием на систематическую ошибку, обусловленную нелинейностью шкалы рефлектометра. Среди других составляющих погрешности, могущих оказать влияние, указывают шумовую, интерференционную, поляризационную [1].

В то же время погрешность измерения коэффициента затухания ОВ является существенно важной: при измерении кабелей с повышенными требованиями к величине коэффициента затухания ОВ для магистральных волоконно-оптических линий связи длиной в несколько километров, а также при проведении испытаний образцов кабельной продукции, имеющих, в соответствии с ограниченным размером испытательных установок, длину менее 1 км.

Систематическая погрешность измерения коэффициента затухания ОВ современных рефлектометров величиной 1–3 % является преобладающей при длинах ОВ в несколько километров. При уменьшении измеряемой длины погрешность возрастает по степенной функции, что обусловлено влиянием указанных составляющих погрешности на точность измерений коэффициента затухания ОВ [2, 3]. При этом, нормативная документация [4], при определении методов испытаний ОВ в составе оптических кабелей, предписывает проводить измерения коэффициента затухания при длине ОВ не менее 1 км. На практике, минимальная длина ОВ для достоверных (но не точных) измерений, представляется равной 0,6 км. При меньших длинах участков, ошибка не представляется монотонной функцией, а имеет значительные флуктуации. Кроме того, на рефлектограммах наблюдаются участки с интервалом корреляции, сопоставимым с пространственной длительностью излучаемого импульса (10...30 м) [5].

Все виды погрешностей измерения коэффициента затухания рефлектометра обусловлены флуктуациями амплитуд отсчетов рефлектограммы, образующих т.н. «шумовую дорожку», статистические свойства которой и определяют погрешность. При этом, при нормальном шуме, ширина шумовой дорожки $2\Delta B \approx 4.6 \sigma_R$ (для 98 % достоверности), где σ_R – среднеквадратическое отклонение шума (СКО) [1].

При измерении коэффициента затухания применяется главным образом метод наименьших квадратов (МНК), при этом предполагается независимость отсчетов рефлектограммы, а СКО погрешности измерения метода определяется через СКО шума как: $\sigma_{LSA} = \frac{\sigma_R 2\sqrt{3}}{L\sqrt{N_L}}$, где N_L – число

пространственных точек отсчета рефлектограммы, участвующих в усреднении на измеряемом участке трассы длиной L [2]. Через ширину шумовой дорожки $2\Delta B$ (здесь и далее жирным шрифтом выделены величины в децибелах), погрешность измерения коэффициента затухания можно записать в виде: $\Delta\alpha_{LSA} = \frac{2\Delta B 2\sqrt{3}}{L\sqrt{N_L}}$. При этом линейные преобразования величин допустимы с учетом относительной малости соотношения $\Delta B/B$, где B – сигнал/шум, $\Delta B \approx 2 \cdot 10^{-B/5}$ (для $B \geq 5$) [1]. При измерении непротяженных трасс затуханием в ОВ можно пренебречь и $B = (\rho_1 + b)/2$, где ρ_1 – соотношение сигнал шум для одного отсчета (импульса) в одной точке рефлектограммы без накопления, а выигрыш некогерентного накопления $b = 10\log\sqrt{N_a}$, где N_a – количество отсчетов за время усреднения [1]. Данная погрешность является преобладающей при измерении протяженных трасс.

Кроме шумовой погрешности, вызванной спонтанными шумами, имеется интерференционная погрешность (шумы когерентности), которые, согласно [1], определяются как результат взаимодействия импульса рефлектометра с неоднородностями волокна. При этом амплитуда когерентных шумов по шкале рефлектометра будет равна: $\Delta B \approx \frac{2}{\sqrt{N_c}}$, где $N_c = \frac{m\tau v_r}{2L_c}$ – число пространственных некогерентных сегментов импульса лазера Фабри-Перо с длительностью τ , излучающего на m продольных модах, где $L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda n}$ – длина когерентности излучения лазера с длиной волны λ и шириной спектральной линии $\Delta\lambda$, с учетом показателя преломления n . При этом оценка погрешности измерения для МНК $\sigma_{LSA} \approx 4,2 \frac{\lambda}{\sqrt{n\Lambda}} \cdot \frac{1}{L^{1,5}}$, определяется, шириной спектра лазера Λ и длиной волокна и является преобладающей при коротких измеряемых длинах ОВ [2].

Поляризационная погрешность обусловлена как поляризационной чувствительностью элементов рефлектометра, так и биениями двулучепреломления в ОВ и оценивается в несколько сотых децибел [1]. Среди методов уменьшения поляризационной погрешности самым распространенным является использование поляризационного применения поляризационного смесителя, случайным образом изменяющего фазу поляризации и изменение длины волны излучения лазера рефлектометра во время измерения, например, путем изменения его температуры [6]. При этом, применение поляризационного смесителя улучшает погрешность более чем в 2 раза, а изменение длины волны излучения показывает еще большую эффективность.

В то же время, нормативный метод измерения затухания (и его коэффициента) методом обратного рассеяния не допускает использования в схеме измерения каких-либо внешних устройств, кроме измерительной

катушки, при этом, также накладываются ограничения на отклонение центральной длины волны передатчика рефлектометра от нормируемой и допустимую ширину спектра [7].

С целью сглаживания флуктуаций предпринимались также попытки применения постобработки рефлектограмм методами оптимальной фильтрации сигналов, в частности методами адаптивной фильтрации с использованием фильтра Калмана. Несмотря на то, что флуктуации как сигнала рефлектограммы, так и ошибки измерения, путем подбора весового коэффициента фильтрации, удалось в некоторых случаях уменьшить примерно вдвое, тем не менее, в других случаях, улучшений добиться не удалось [5].

Автором в работе [8] предложен подход к рассмотрению влияния флуктуаций на основе их статистических оценок, полученных в теории радиотехнических систем, исходя из аналогии имеющейся задачи обработки импульсного сигнала в рефлектометре с задачей обработки сигнала импульсного радиолокатора от движущейся цели.

Рассмотрение влияния флуктуаций на основе их статистических оценок, полученных в теории радиотехнических систем, исходит из аналогии имеющейся задачи обработки импульсного сигнала в рефлектометре с задачей обработки флуктуирующего сигнала импульсного радиолокатора от движущейся цели. При этом, в основу аналогии положены общность как статистических свойств сигнала на входе устройства обработки, так и структурной схемы устройства его обработки. Полученные результаты существенным образом уточняют ранее указанные и состоят в следующем.

Во-первых, число точек N_L , участвующих в усреднении, по сути – число некоррелированных отсчетов рефлектограммы. Это является следствием свойства стационарных эргодических процессов [9], согласно которому, дисперсия среднего значения процесса за период усреднения $\sigma^2(T)$ определяется, в общем случае, характером корреляции между отсчетами и при продолжительном времени усреднения $T \gg \tau_k$, где τ_k – интервал корреляции; $\sigma^2(T) \leq \sigma_R^2 \frac{2\tau_k}{T} = \frac{\sigma_R^2}{N_e}$, где $N_e = \frac{T}{2\tau_k}$ – число некоррелированных отсчетов случайного процесса. При этом, на основании экспериментальных данных, пространственный интервал корреляции l_k на рефлектограммах близок к пространственной длительности импульса $l_{и}$, и число независимых отсчетов рефлектограммы при усреднении $N_e = \frac{L}{2l_k} \ll N_L$, что существенно увеличивает погрешность оценки коэффициента затухания, с учетом уменьшения количества отсчетов [8]. Вместе с тем, нужно отметить, что поскольку длительность импульса и ширина спектра непосредственно связаны между собой, данная оценка оказывается эквивалентной приводимой ранее оценке погрешности, выраженной через ширину спектра излучения, а независимость ее от длительности импульса

объясняется в данном случае сопоставимостью интервала корреляции с длительностью импульса.

Во-вторых, амплитуда огибающей импульсного флуктуирующего сигнала имеет отличный от нормального, закон обобщенного двумерного распределения Рэлея (Рэлея-Райса) [9], с параметром сигнал/шум, лишь при больших значениях последнего переходящим в нормальный закон. Соответственно, оптимальной оценкой амплитуды такого сигнала при его измерении, является оценка, полученная на основании максимума функции правдоподобия для сигнала со случайной начальной фазой [9], при этом, для достоверного измерения требуется значение сигнал/шум $\rho_1 \geq 10$ дБ, при котором сигнал можно рассматривать как нефлуктуирующий [8]. Более точное значение требуемого соотношения сигнал/шум при измерении амплитуды, для заданной его точности можно получить, опираясь на требуемые данные при радиолокационном обнаружении, поскольку оценка при обнаружении сигнала по критерию максимума апостериорной плотности его вероятности, эквивалентна с точностью до постоянного множителя задаче измерения амплитуды сигнала [9].

В-третьих, во многих случаях, с учетом поляризационной ошибки, вызванной умеренными биениями двулучепреломления и вариациями модового пятна, задача расчета требуемого соотношения сигнал/шум одиночного импульса, с заданной точностью измерения, подобна задаче определения этого параметра при радиолокационном обнаружении флуктуирующей цели с замираниями сигнала, инженерная методика которой была предложена Бартоном [10]. Согласно нее, требуемое соотношения сигнал/шум $\rho_{тр}$ зависит от параметров (вероятности правильного обнаружения D и ложной тревоги F) и для обнаружения пачки импульсов рассчитывается на основе требуемого соотношения для одного импульса $\rho_1(D, F)$ с учетом накопления импульсов и наличия дополнительных потерь: флуктуационных и интегрирования. Потери некогерентного интегрирования $L_i(\rho_1, N)$ зависят как от $\rho_1(D, F)$, так и от общего числа импульсов N и в данном случае-максимальные при полной некогерентности импульсов. Флуктуационные потери зависят от числа независимых значений сигнала N_e из общего числа N в пачке, отстоящих друг от друга на интервал корреляции τ_k : $L_f(D, F, N_e) = L_{f0}(D, F)(dB)/N_e$. Оценка флуктуационных потерь, при достоверности измерения 95-98% составляет для худшего случая около 12 дБ, что требует уже значительной величины $\rho_1 \geq 22$ дБ[8].

В-четвертых, в общем случае сильно выраженного двулучепреломления, приводящего к ярко выраженной периодической структуре флуктуаций, аналогия с указанной задачей радиолокации, становится неполной и остается констатировать, что дальнейшее увеличение соотношения сигнал/шум не улучшает точности измерения и она становится ограниченной только числом независимых отсчетов рефлектограммы N_e на длине измерения с учетом биений [8], при этом, использование более

коротких измерительных импульсов при большом динамическом диапазоне становится предпочтительным. Также надо отметить указание на возможность получения большего числа декоррелированных отсчетов сигнала в радиолокационной схеме путем изменения несущей частоты передатчика [10], что согласуется с ранее упомянутым методом изменения длины волны лазера.

Полученные результаты накладывают ограничения на параметры измерений, позволяют более оптимально выбирать их, а также позволяют прийти к выводу, что рефлектометры, обеспечивающие большое соотношение сигнал/шум нужно использовать не только для измерения протяженных трасс, но и для точного измерения их коротких участков.

1. А.В. Листвин, В.Н. Листвин, Рефлектометрия оптических волокон. Москва. ЛЕСАРпт. 2005.
2. М.А. Таранов, Б.Г. Горшков, К.М. Жуков и др., ПТЭ. №4. С. 90 (2020).
3. Б.Г. Горшков, Г.Б. Горшков, К.М. Жуков, КЭ. Т. 49. С. 581 (2019).
4. ГОСТ Р 52266-2020. Оптические кабели. Общие технические условия.
5. Е.А. Тараскин, И.В. Фролов // ВКВО-2021. Сборник тезисов докладов. Пермь. 2021. С. 357.
6. Е.В. Белянко, В.И. Бобров, М.Л. Гринштейн и др., «Оптическая рефлектометрия-2016», Сборник тезисов докладов. Пермь., С.43. (2016).
7. ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012 Волокна оптические. Часть 1-40. Методы измерений и проведение испытаний. Затухание.
8. И.В. Фролов, ПТЭ 2023, № 5, С. 114 (2023).
9. В.И. Тихонов, Статистическая радиотехника. Москва: Советское Радио. 1966.
10. D.K. Barton, Simple Procedures for Radar Detection Calculations. IEEE Trans. 1969. AES-5. № 5. P. 837. Бартон // Зарубежная радиоэлектроника. 1970. №5. С. 3.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СПЕЦИАЛЬНЫХ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК
НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

А.В. Кривовичев, М.Ю. Власов

АО «Инжиниринговый центр волоконной оптики», Саранск

E-mail: krivovi4eff@yandex.ru

В рамках данной работы специалистами АО «Инжиниринговый центр волоконной оптики» для получения специальных волоконно-оптических заготовок был использован низкотемпературный метод плазмохимического осаждения SPCVD (Surface Plasma Chemical Vapour Deposition) для получения силикатных стекол легированных тетрафторидом углерода (CF_4). Данный тип бинарного химического соединения используется в данной технологии при формировании депрессированной светоотражающей оболочки.

Технология SPCVD основывается на преобразовании галогенидов исходных реагентов в окиды в микроволновом разряде пониженного давления. Особенностью технологии является неполное окисление галогенидов в газовой фазе, так что окончательное формирование стекла и его структуры происходит лишь на опорной поверхности.

На сегодняшний день на производственной площадке АО «Инжиниринговый центр волоконной оптики» осуществляется плазмохимический синтез радиационно-стойких оптических заготовок с депрессированной фторсиликатной оболочкой и нелегированной кварцевой сердцевиной, а также ведутся работы по изготовлению «жакетных» труб с высокой концентрацией фторидных групп в структурной матрице кварцевого стекла.

Также на производственной площадке АО «Инжиниринговый центр волоконной оптики» осуществляется плазмохимический синтез оптических преформ состава SiO_2/SiO_2F с кварцевой сердцевиной и фторсиликатной отражающей оболочкой. (технология POVD- Plasma Outside Vapour Deposition). В данной технологии на поверхность кварцевого стержня, при помощи неизотермической «холодной» ВЧ плазмой производится синтез аморфных слоев диоксида кремния, легированных гексафторидом серы (SF_6).

Наиболее широкое применение двухслойные кварцевые световоды состава SiO_2/SiO_2F , полученные из данного типа оптических заготовок, находят в качестве высокоапертурного гибкого технологического инструмента для передачи мощного лазерного излучения к объекту воздействия – в медицине и промышленности (сварка, резка, обработка металла и т.д.). Так называемые силовые световоды. Данный тип «силовых» световодов также покрывается металлическим покрытием. Данный тип световодов предназначен для применения в условиях повышенных температур и механических нагрузок. Герметично закрытые

оптические волокна с металлическим покрытием имеют все преимущества волокон кварц-кварц. Дополнительно к этому существенным преимуществом является, увеличение механической прочности и большее сопротивление усталости по сравнению с негерметичными и покрытыми полимером волокнами. Металлопокрытые световоды могут использоваться в спектральном диапазоне 200 – 2400 нм, сохраняют оптические и механические свойства в температурном диапазоне от $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+750\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при влажности вплоть до 100 %. Такие световоды оптимальны для использования в высоком вакууме.

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ АКРИЛАТНЫХ ПОКРЫТИЙ КВАРЦЕВЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ АО «ОПТИКОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ»

Т.В. Волкова¹, С.Г. Кострюков¹, М.В. Буралкин¹

¹ Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

² АО «Оптиковолокonné системы», Саранск

E-mail: sendboxvv@mail.ru

В настоящее время отверждаемые под действием ультрафиолетового (УФ) излучения акриловые полимеры (акрилаты) и композиты на их основе получили широкое распространение в самых различных сферах жизнедеятельности при производстве отделочных, упаковочных, изолирующих, защитных материалов и покрытий, в том числе способных эксплуатироваться в экстремальных условиях, и др. В частности, благодаря наличию необходимых физико-химических свойств УФ-отвержденные фотополимерные композиты на основе акрилатов применяются в качестве защитных оболочек кварцевой сердцевины оптоволоконного кабеля [1, 2].

Для получения качественных УФ-отвержденных первичного и вторичного покрытий, соответствующих предъявляемым к ним требованиям, заданной толщины необходимо учитывать множество факторов. К их числу относят исходный химический состав жидкой акрилатной композиции, технологические условия нанесения покрытия, используемый тип источника УФ-излучения, скорость полимеризации и др. [3-5]. При этом следует отметить, что используемые в настоящее время на производстве оптоволокна в АО «Оптиковолокonné системы» УФ-отверждаемые композиты на основе акрилатов являются импортными. В соответствии с этим актуальным является разработка составов акрилатных покрытий отечественного производства.

В настоящей работе с использованием методов ИК и ЯМР-спектроскопии определены основные элементы химического состава УФ-отверждаемых (ртутными лампами, LED) акрилатных композитов и проведен эксперимент по созданию аналога акрилатного покрытия на основе экспериментально полученных данных.

1. S. Schmid, A. Toussaint, *Specialty Optical Fibers Handbook* by T. F. Morse, Alexis Mendez (eds), 2011.

2. А.А. Гутенев, О.Э. Бабкин, М.Ю. Власов и др., Лакокрасочные материалы и их применение. **4**, 33 (2020).

3. Han do Kim, Seung Gu Kang, Chang Sik Ha, *Journal of Applied Polymer Science*. **46**, 1339 (1992).

4. О.Э. Бабкин, Л.А. Бабкина, А.В. Арабей, И. Биркс, Лакокрасочные материалы и их применение. **3**, 8 (2016).

5. Feyza Karasu, Celine Croutxe-Barghorn, Xavier Allonas, et al., *Journal of polymer science A*. **52**, 3597 (2014).

Industrial photonics

SYNTHESIS OF OPTICAL FREEFORMS WITH A MODIFIED RAY-MAPPING METHOD FOR IMAGING OPTICS APPLICATIONS

A.O. Voznesenskaya, Y.V. Terlo, A.V. Bakholdin
ITMO University, St. Petersburg
E-mail: voznesenskaya@itmo.ru

Modern technologies for the development of industrial photonics systems require achieving the diffraction quality of the formed image and at the same time ensuring the compactness of optical interfaces by minimizing the number of components. The use of a new component base based on *freeform* optics makes it possible to satisfy these requirements. It should be noted that the application of *freeform* optics has expanded significantly in the last decade, thanks to the emergence of a wide range of high-quality optical polymers, high-precision equipment for forming complex surface profiles, the development of mathematical tools and the improvement of computing capacity.

As a result of studying methods for the synthesis of *freeform* optics, it was revealed that most of them are intended for the development of lighting systems and do not take into account image quality criteria [1]. In particular, a nontrivial task of mathematical modeling of freeform optics is the correct description of the transformation of the input and output wavefronts while observing the permissible distortions described by the wave aberration function, as well as taking into account a significant number of restrictions associated with the geometric parameters of freeform optical surfaces [2]. In addition, for such inverse methods of optics calculation, a particular difficulty lies in determining the “starting point” of an optical system.

Modification of the *ray-mapping method* made it possible to develop algorithms for calculating *freeform* optics for imaging applications. The proposed approach is based on the conjugation of congruence of the input and output wavefronts, inverse ray tracing, determining a set of points of the desired *freeform* surface, its subsequent approximation and verification [2,3].

The paper presents developed calculation algorithms and modeling results for refractive and mirror *freeform* optics for space systems, collimators and augmented reality devices, and also shows the most effective ways to describe the resulting *freeform* surfaces and their subsequent integration into standard software tools.

1. J.P. Rolland, M.A. Davies, T.J. Suleski, et al., *Optica*. **8**. 161-176 (2021).
2. Y.V. Mazur, A.O. Voznesenskaya, *J. Opt. Technol.* **89**. 89-93 (2022).
3. Y.V. Terlo, A.O. Voznesenskaya, *J. Opt. Technol.* **90**, 242-248 (2023).

DEVELOPMENT OF ACRYLATE COATINGS COMPOSITIONS OF QUARTZ FIBERS FOR JSC «OPTIC FIBER SYSTEMS»

T.V. Volkova¹, S.G. Kostryukov¹, M.V. Buralkin²

¹ *National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk*

² *JSC «Optic fiber Systems», Russia*

E-mail: sendboxvv@mail.ru

Currently, acrylic polymers (acrylates) and composites based on them, cured under the influence of ultraviolet (UV) radiation, are widely used in various spheres of life in the production of finishing, packaging, insulating, protective materials and coatings, including those capable of operation in extreme conditions, etc. In particular, due to the presence of the necessary physicochemical properties, UV-cured photopolymer composites based on acrylates are used as protective sheaths for the quartz core of fiber optic cables [1, 2].

To obtain high-quality UV-cured primary and secondary coatings that meet the requirements for them and a given thickness, many factors must be taken into account. These include the initial chemical composition of the liquid acrylate composition, technological conditions for applying the coating, the type of UV radiation source used, the polymerization rate, etc. [3–5]. It should be noted that the UV-curable acrylate-based composites currently used in the production of optical fibers at JSC Optical Fiber Systems are imported. In accordance with this, the development of domestically produced acrylate coating compositions is relevant.

In this work, using IR and NMR spectroscopy methods, the main elements of the chemical composition of UV-curable (mercury lamps, LED) acrylate composites were determined and an experiment was conducted to create an analogue of an acrylate coating based on experimental data.

1. S. Schmid, A. Toussaint, *Specialty Optical Fibers Handbook* by T. F. Morse, Alexis Mendez (eds), 2011.

2. A.A. Gutenev, O.E. Babkin, M.Yu. Vlasov, O.S. Aikasheva, *Paints and varnishes and their application*. **4**, 33 (2020).

3. Han do Kim, Seung Gu Kang, Chang Sik Ha, *Journal of Applied Polymer Science*. **46**, 1339 (1992).

4. O.E. Babkin, L.A. Babkina, A.V. Arabei, I. Birx, *Paints and varnishes and their application*. **3**, 8 (2016).

5. Feyza Karasu, Celine Croutxe-Barghorn, Xavier Allonas, Leendert G.J. Van Der Ven, *Journal of polymer science A*. **52**, 3597 (2014).

СПИСОК АВТОРОВ

Абрамов А.С.	77
Абрамов А.Н.	70, 75, 79
Афанасьев Ф.В.	78
Авдеев И.Д.	219
Аверкиев Н.С.	209, 2015
Аветисов И.Х.	112, 115
Агарков Д.А.	126
Александров А.А.	179
Алексеева А.С.	35, 199
Алексеев П.А.	30
Алешкина С.С.	70
Алышев С.В.	75, 78, 79
Арискин А.О.	171, 181
Асеев В.А.	118
Бабкина А.Н.	118
Байдусь Н.В.	22
Бакаева А.В.	111, 112
Барабан А.П.	32
Бокшиц Ю.В.	34
Барыкина С.Е.	123
Бахолдин А.В.	232
Белов А.И.	22
Беляев А.Н.	201
Бушукина О.С.	201
Бескачко В.П.	25
Бикеев А.С.	36
Бородин Б.Р.	30
Бобров В.С.	199
Болдырев К.Н.	26
Борик М.А.	126, 127
Бродниковский Ю.П.	121, 197
Бубнов М.М.	70
Бузаева Е.М.	126, 171
Бузынин Ю.Н.	27
Букарев С.А.	127
Буралкин М.В.	240
Бурмистров Д.Ф.	79
Бутвина Л.Н.	73
Бутенков Д.А.	111, 112
Буфетов И.А.	54
Варапай Н.В.	34, 163
Вайнер Ю.Г.	198
Волков И.А.	76
Василенкова А.	111
Вахрушев А.С.	75, 79
Вильченко С.А.	175
Власов М.Ю.	76, 238
Вознесенская А.О.	232
Волкова Т.В.	227, 240
Воронина Е.Н.	115

Гадеева А.А.	199
Галимов А.И.	30
Герасимов М.В.	63, 171
Глебов И.С.	31, 109
Глушков В.В.	212
Голеницкий К.Ю.	220
Грибко В.В.	175
Гупалов С.В.	219
Гурьянов А.М.	218
Гурьянов С.А.	2018
Гущин С.В.	33
Дурнев М.В.	30
Давыдкин В.И.	101
Данилов Ю.А.	119
Денкер Б.И.	178
Долгополов А.Д.	118
Дорофеев В.В.	125, 174
Дорохин М.В.	120
Доунг Ч.А.	215
Дрозд А.В.	32
Дрозд В.Е.	32
Дудин Ю.А.	120
Елисеев И.А.	30
Елисеева А.А.	170
Елопов А.В.	78
Ершов А.В.	22
Жамков А.М.	173
Жегучева Ю.В.	170
Желева Е.Б.	113
Жукова Л.В.	74, 110, 114, 122, 123, 124
Журавлев М.В.	199
Зайцева Е.В.	23
Зараменских К.С.	73, 176
Зверев П.Г.	167
Здоровейцев А.В.	22, 120
Здоровейцев Д.А.	119
Зимин Е.Э.	199
Зиятдинова М.З.	121
Зубков В.Г.	168
Зубков С.Ю.	120
Зыкова С.С.	115
Зырянова К.С.	118
Зюзин А.М.	127
Кабыкина Е.Ю.	110, 122, 124
Кругликов В.Я.	32
Камынин В.А.	178, 179
Карабутов А.А.	113, 197
Ким А.К.	125, 174
Ким К.Г.	115
Киреев К.В.	63
Князькова О.В.	26
Ковгар В.В.	121, 163, 166

Колесникова В.И.	200
Колташев В.В.	125, 174
Конаков А.А.	23, 222
Королев Д.С.	222
Кондрашин В.М.	116
Конюшкин В.А.	33, 179
Коптев М.Ю.	125, 174
Кораблева Г.М.	126
Кораблева С.Л.	200
Король А.В.	26
Котова Л.В.	30
Кременецкий М.В.	36
Кривовичев А.В.	238
Крюков Р.Н.	22, 120
Кудрин А.А.	27
Кострюков С.Г.	240
Кузнецов М.С.	73, 176
Кузнецов С.В.	33, 179
Кукаркина С.Э.	199
Кулебякин А.В.	126, 127
Курицина И.Е.	126
Кучеренко Ф.М.	124
Кяшкин В.М.	35, 113, 126
Корсаков А.С.	114
Лапин В.А.	77
Ларина Н.А.	227
Латыпов Р.М.	25
Левченко А.Е.	172
Липатов Д.С.	70
Липатьев А.С.	31, 109, 172
Липина О.А.	168
Лихачев М.Е.	70
Ломонова Е.Е.	126, 127
Лосин А.Л.	118
Львов А.Е.	74, 110, 114, 124
Ляпин А.А.	33
Максимов Р.Н.	171
Михайлов Ю.В.	31, 109, 172
Малашкевич Г.Е.	163, 166
Мальшев Е.И.	119
Мардаев Е.Ю.	63
Меленцова А.А.	168
Мелькумов М.А.	70, 75, 78, 79
Муравьев С.В.	125, 174
Метлин М.Т.	170
Милович Ф.О.	126, 127
Миронов П.П.	77
Можевитина Е.Н.	115
Морозов М.В.	176
Морозов О.А.	113, 200
Моторин С.Е.	125, 174
Мурзашев А.И.	28

Мызина В.А.	126, 127
Мыльников В.Ю.	205
Мягкова Е.В.	117
Накладов А.Н.	33, 179
Нестоклон М.О.	219
Никоноров Н.В.	95
Нищев К.Н.	76, 163
Олейник Д.И.	75
Осипов В.В.	171
Охримчук А.Г.	121
Паймеров С.К.	28
Панкратов В.	127
Пахомова А.А.	73, 176
Пестерева П.В.	74, 110, 114, 122, 123, 124
Пилушко С.М.	73, 176
Плехова Л.С.	121
Полякова Г.В.	73
Потапова К.А.	115
Поташин С.О.	215
Пройдакова В.Ю.	33
Пыненков А.А.	112
Рахлин М.В.	30
Ревин А.А.	222
Романенко А.Р.	73, 176
Рунина К.И.	111, 112, 117
Рыбалтовский А.А.	70, 178
Рюмкин К.Е.	78
Рябочкина П.А.	33, 35, 36, 126, 171, 173, 199, 201
Салимгареев Д.Д.	74, 114, 123, 124
Сверчков С.Е.	178
Сектаров Э.С.	26
Семашко В.В.	113, 169, 197, 200
Сергеев М.М.	118
Серкина К.С.	26, 170
Сигаев В.Н.	31, 101, 109
Скворцов Д.А.	36
Созыкин С.А.	25
Соколовский Г.С.	215
Спицына Ю.В.	105
Степанова И.В.	26, 170
Стопкин С.И.	31, 109
Стрекалов П.В.	117
Судьин А.В.	76, 112
Табачкова Н.Ю.	35, 126, 127
Тарасенко А.С.	21
Таратынова А.Д.	199, 201
Терло Я.В.	232
Титова А.М.	27
Трикшев А.И.	178
Тютюнник А.А.	168
Укхтари М.С.	205
Умников А.А.	75

Усламина М.А.	76, 112
Ушаков С.Н.	76, 112
Федотов С.С.	31, 109
Фирстов С.В.	75, 78, 79
Фирстова Е.Г.	75, 78
Федоров П.П.	33
Фролов И.В.	233
Харахордин А.В.	78, 79
Харисова Р.Д.	118
Хегай А.М.	75, 78
Хрущалина С.А.	35, 199, 201
Царев В.С.	112, 172
Цветков В.Б.	178, 179
Чалков В.Ю.	27
Чижова А.А.	23
Чуфаров А.Ю.	168
Шабров Н.О.	36
Шавельев А.А.	113
Шакуров Г.С.	200
Шарафеев А.Р.	125, 174
Шахгильдян Г.Ю.	101
Шенгуров В.Г.	27
Ширманкин А.В.	178, 179
Шитов В.А.	171
Шишкин А.Д.	169
Шкапина А.С.	120
Шляпкина В.И.	199
Шмыгалев А.С.	114
Южаков И.В.	74
Южакова А.А.	74, 114, 124
Юдин Н.А.	76
Юшков Д.А.	22
Яшков М.В.	70, 79

AUTHOR INDEX

Abramov A.S.	91
Abramov A.N.	90, 93
Alekseev P.A.	47
Alekseeva A.S.	52, 205
Alexandrov A.A.	195
Alyshev S.V.	90, 92, 93
Ariskin A.O.	188, 190
Aseev V.A.	153
Avdeev I.D.	227
Averkiev N.S.	224
Babkina A.N.	153
Bakaeva A.V.	145, 146
Bakholdin A.V.	242
Barykina S.E.	158
Belov A.I.	39
Belyaev A.N.	207
Beskachko V.P.	42
Bokshits Yu.V.	51
Boldyrev K.N.	43
Borik M.A.	161
Borodin B.R.	47
Brodnikovskiy Yu.P.	147, 203
Bukarev S.A.	161
Buralkin M.V.	243
Burmistrov D.F.	93
Bushukina O.S.	207
Butenkov D.A.	145, 146
Buzynin Yu.N.	44
Chalkov V. Yu.	44
Chizhova A.A.	40
Danilov Yu.A.	154
Davydkin V.I.	207
Denker B.I.	194
Dolgopolov A.D.	153
Dorofeev V.V.	149, 160
Dorokhin M.V.	155
Downing C.A.	224
Drozd A.V.	49
Drozd V.E.	49
Dudin Yu.A.	155
Durnev M.V.	47
Eliseev I.A.	47
Eliseeva A.A.	187
Elopov A.V.	92
Ershov A.V.	39
Fedorov P.P.	50
Fedotov S.S.	48, 143
Firstov S.V.	90, 92, 93
Firstova E.G.	90, 82
Gadeeva A.A.	205
Galimov A.I.	47

Gerasimov M.V.	81, 188
Glebov I.S.	48, 143
Gribko V.V.	191
Guryanov A.M.	216
Guryanov S.A.	216
Gushchin S.V.	50
Kabykina E. Yu.	144, 157, 159
Kamynin V.A.	194, 195
Karabutov A.A.	147, 203
Kharakhordin A.V.	90, 93
Kharisova R.D.	153
Khrushchalina S.A.	52, 205, 207
Kim A.V.	149
Kim K.G.	149, 160
Kireev K.V.	81
Knyazkova O.V.	43
Kolesnikova V.I.	206
Koltashev V.V.	149, 148
Konakov A.A.	40, 218160
Kondrashin V.M.	151
Konyushkin V.A.	50
Koptev M. Yu.	149, 160
Korableva S.L.	206
Korol A.V.	43
Korolev D.S.	230
Korsakov A.S.	138
Kostryukov S.G.	243
Kotova L.V.	47
Kruglikov V. Ya.	49
Kryukov R.N.	39
Kucherenko F.M.	159
Kudrin A.A.	44
Kukarkina S.E.	205
Kulebyakin A.V.	161
Kuznetsov M.S.	88, 192
Kuznetsov S.V.	50, 195
Kyashkin V.M.	52, 137
Lapin V.A.	91
Larina N.A.	161
Latypov R.M.	42
Lipatiev A.S.	48, 143, 189
Lomonova E.E.	161
Losin A.L.	161
Lvov A.E.	89, 144, 148, 149
Lyapin A.A.	50
Maksimov R.N.	188
Malashkevich G.E.	181
Malyshev E.I.	154
Mardaev E. Yu.	81
Melkumov M.A.	90, 92, 93
Metlin M.T.	187
Mikhailov Yu.V.	48, 143, 189

Milovich F.O.	161
Mironov P.P.	91
Morozov M.V.	192
Morozov O.A.	147, 206
Motorin S.E.	149, 160
Mozhevitina E.N.	150
Murzashev A.I.	45
Myagkova E.V.	152
Mylnikov V.Yu.	224
Myzina V.A.	161
Nakladov A.N.	50, 195
Nestoklon M.O.	227
Nikonorov N.V.	129
Nishchev K.N.	181
Okhrimchuk A.G.	189
Oleinik D.I.	90
Osipov V.V.	188
Pakhomova A.A.	88, 192
Pankratov V.	141, 161
Paymerov S.K.	45
Pestereva P.V.	89, 144, 148, 157, 158, 159
Petrova O.B.	138, 145, 146, 152
Pilyushko S.M.	88, 192
Polyakova G.V.	88
Potapova K.A.	150
Potashin S.O.	224
Proydakova V.Yu.	50
Pynenkov A.A.	146
Rakhlin M.V.	47
Revin A.A.	230
Romanenko A.R.	88, 192
Runina K.I.	145, 146, 152
Ryabochkina P.A.	50, 52, 161, 188, 190, 205
Rybaltovsky A.A.	194
Salimgareev D.D.	89, 148, 158, 159
Sectarov E.S.	43
Semashko V.V.	147, 186, 203, 206
Sergeev M.M.	153
Serkina K.S.	43, 187
Shakhgildyan G.Yu.	135
Shakurov G.S.	206
Sharafeev A.R.	149, 160
Shaveliev A.A.	147
Shengurov V.G.	44
Shevchenko G.P.	51
Shirmankin A.V.	194, 195
Shishkin A.D.	186
Shitov V.A.	188
Shkapina A.S.	155
Shlyapkina V.I.	205
Shmygalev A.S.	148
Sigaev V.N.	48, 135, 143

Sozykin S.A.	42
Spitsyna Yu.V.	134
Stepanova I.V.	43, 187
Stopkin S.I.	48, 143
Strekalov P.V.	152
Sverchkov S.E.	194
Tabachkova N.Yu.	52, 161
Tarasenko A.S.	38
Taratynova A.D.	205, 207
Terlo Ya.V.	242
Titova A.M.	44
Trikshev A.I.	194
Tsarev V.S.	156, 189
Tsvetkov V.B.	194, 195
Ukhtary M.S.	224
Umnikov A.A.	90
Ushakov S.N.	146
Uslamina M.A.	146
Vakhrushev A.S.	90, 93
Vasilenkova A.	145
Vilchenko S.A.	191
Volkova T.V.	161, 243
Voronina E.N.	150
Voznesenskaya A.O.	242
Yushkov D.A.	39
Yuzhakov I.V.	89
Yuzhakova A.A.	89, 148, 159
Zaitseva E.V.	40
Zaramenskikh K.S.	192
Zdoroveyshchev A.V.	39
Zdoroveyshchev D.A.	154
Zhamkov A.M.	190
Zhegucheva Yu.V.	187
Zheleva E.B.	147
Zhukova L.V.	89, 144, 148, 157, 158, 159
Zhuravlev M.V.	205
Zimin E.E.	205
Zubkov S.Yu.	155
Zverev P.G.	185
Zykova S.S.	150
Zyryanova K.S.	153
Zyuzin A.M.	161