



ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПРОХОРОВСКИЕ НЕДЕЛИ»



11-23 ОКТЯБРЯ 2018 г.



**Школа-конференция
молодых ученых**

«ПРОХОРОВСКИЕ НЕДЕЛИ»

Тезисы докладов

11 – 23 октября 2018 г.

Москва

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

УДК 53; 535; 537; 538,9

Тезисы докладов школа-конференция молодых ученых ИОФ РАН «Прохоровские недели». – Москва, 2018. – 142 с.

ISBN 978-5-905109-02-7

В сборник включены материалы конференции молодых ученых ИОФ РАН, проходившей в октябре 2018 г. Школа-конференция молодых ученых «Прохоровские недели» организуется как форум научной молодежи ИОФ РАН - молодых ученых, аспирантов и студентов старших курсов. Тематика конференции включает приглашенные лекции и оригинальные доклады участников по всем основным направлениям научной деятельности Института.

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Совет молодых ученых при поддержке дирекции ИОФ РАН

Председатель конференции:

В.В. Глушков, д.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе

Оргкомитет:

С.В. Демишев, д.ф.-м.н., профессор, заместитель директора по научной работе

Е.В. Захарова, заместитель руководителя сектора оценки и развития

С.Н. Андреев, д.ф.-м.н, и.о. ученого секретаря

М.Я. Гришин, м.н.с., М.Н. Маякова, н.с.

Е.Э. Дунаева, к.т.н., с.н.с., Д.В. Поминова, к.ф.-м.н.,

М.А. Кожаев, асп., И.Д. Романишкин, асп.,

А.В. Кулебякин, к.т.н., с.н.с., В.Е. Шукшин, к.ф.-м.н., зав. лаб.

А.М. Кузьменко, к.ф.-м.н., с.н.с.

Время проведения конференции – 11-23 октября 2018 г.

Место проведения – ИОФ РАН, Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

© Коллектив авторов, 2018

© Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Содержание

Секция 1 ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И КВАНТОВАЯ ОПТИКА	4
Секция 2 КВАНТОВАЯ МАКРОФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД.....	47
Секция 3 ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ: НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОСТРУКТУРЫ.	69
Секция 4 ФИЗИКА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ.....	90
Секция 5 ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	97
Секция 6 ФИЗИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ И МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ.....	113
Секция 7 РАДИОФИЗИКА И АКУСТИКА	131

Секция 1 ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Формирование оптических микроэлементов из термостабильных полимеров с помощью лазерного излучения

Д.В. Ганин¹, Д.С. Дудова², Б.С. Шавкута²,

О.С. Куприянова³, А.Н. Бекин⁴

¹ЦФП ИОФ РАН, НИО

²ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН,

³БИП СО РАН,

⁴МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

E-mail: ganin@optosystems.ru

Постоянное развитие техники, миниатюризация оптических и оптоэлектронных устройств требует создания новых технологий и методов создания оптических

Перспективными современными методами формирования оптических элементов являются аддитивные технологии, использующие различные прозрачные полимерные композиты [1]. Однако использование полимерных материалов в условиях высоких температур и высокой плотности мощности проходящего через них лазерного излучения очень ограничено из-за их разложения и деградации. Интенсивное развитие мощных лазерных систем подразумевает наличие оптических элементов, в том числе асферических, которые могут работать при высокой температуре и повышенной плотности мощности лазерного излучения.

Целью данной работы являлось исследование возможности формирования оптических элементов высокого качества методами прямой УФ и двухфотонной стереолитографии из нового класса термостабильных гетероцепных полимеров.

В работе использовались две экспериментальные установки. Первая была основана на диодном лазерном источнике MDL-III-405 (CNI-Laser) с длиной волны 405 нм и максимальной мощностью излучения 100 мВт. Сканирование осуществлялось с помощью однозеркального двухкоординатного гальваносканера LScanH-10 (Ateko-ТМ, Russia) с диапазоном сканирования $\pm 6^\circ$; в экспериментах использовалось рабочее поле 40×40 мм, максимальная скорость

сканирования до 100 мм/с. Вторая экспериментальная установка использовала фемтосекундный иттербиевый лазер с генератором второй гармоники на длине волны 520 нм, 80 МГц, 1 Вт. Сканирование лазерным излучением осуществлялось с помощью комбинации высокоточных подвижек производства Aerotech и двухзеркального гальваносканера Scanlab. Эта система позволяет достичь точности позиционирования 50 нм и максимальной производительности, доступной в настоящее время. Система перемещения образца интегрирована в единый комплекс под управлением специального программного обеспечения, которое позволяет обрабатывать материал в соответствии с заданной компьютерной моделью. Разное разрешение печати в экспериментах достигалось с помощью набора фокусирующих объективов с числовыми апертурами от 0.2 до 1.2.

В работе использовался термостабильный гетеро-цепный полимер поли-N,N'-(*m*-фенилен) изофталамид в качестве полимерного фотоотверждаемого материала, а диакридамид 4,4'-диаминодифенилоксид в качестве сшивающего агента. Данный полимер был разработан и синтезирован в Байкальском институте природопользования Сибирского отделения Российской академии наук (БИП СО РАН). Этот полимер уникален с точки зрения сохранения его свойств в условиях высоких температур. Исследования показали сохранение его механической стабильности в диапазоне температур до 400°C без существенного ухудшения его оптических свойств [2].

В ходе работы были получены объемные структуры заданных форм, созданные с помощью прямого УФ лазерного отверждения. Определены их оптические, механические свойства. Проведены предварительные эксперименты по фотоотверждению полимерной композиции с помощью двухфотонной лазерной фотополимеризации. Полученные результаты показали принципиальную возможность формирования оптических микроэлементов с высокой производительностью и точностью, для дальнейшего их использования в мощных лазерных системах. Одним из возможных применений полученных результатов может являться прямое формирование коллимирующих асферических линз непосредственно на торцах диодных лазеров высокой мощности.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 18-32-00414_мол_а.

1. *Sultanova N.G., Kasarova S.N., Nikolov I. D.* Optical and Quantum Electronics. 2013, 1-12.
2. *Dudova D., Bardakova K., Kholkhoev B. Et al.* Applied polymer. 2018, 135.
3. *Burdukovsky V., Kholkhoev B., Farion I. Et al.* Phononics. 2016, **2**, 46-63.

Динамика термооптических искажений волнового фронта широкоапертурных активных элементов

С.А. Бельков¹, И.Н. Воронич¹, В.Ю. Гладкий^{1,2},

В.Н. Деркач¹, И.Н. Деркач¹, В.Б. Цветков²

¹«РФЯЦ ВНИИЭФ» ИЛФИ, г. Саров

²НЦЛМТ ИОФ РАН,

*отдел лазерных кристаллов и твердотельных лазеров,
лаборатория активных сред твердотельных лазеров*

E-mail: Iamvet999@gmail.com

Мощные многопроходные лазерные установки [1, 2] разрабатываются для проведения исследований физики горячей плотной плазмы и в интересах осуществления инерциального термоядерного синтеза. Характерной чертой мощных лазерных установок является использование в усилительных каскадах широкоапертурных дисковых активных элементов. Накачка элементов производится импульсными лампами. Часть световой энергии накачки переходит в тепло. Неравномерное выделение тепла посредством нескольких механизмов приводит к искажению волнового фронта проходящего излучения.

В данной работе представлены экспериментальные данные динамики термооптических искажений волнового фронта. Измерения были произведены на канале установки "Луч" [3]. Измерения охватывают временной интервал величиной две миллисекунды с момента начала накачки. После завершения накачки, величина термооптических искажений совершает колебания с частотой примерно 2 кГц. В работе приведены измерения термооптических искажений при различных значениях величины энергии накачки. На основе экспериментальных данных произведена оценка влияния времени задержки прихода усиливаемого импульса относительно момента поджига ламп накачки в усилителе на расходимость лазерного излучения, обусловленную термооптическими искажениями. Произведена оценка частоты

собственных колебаний активного элемента с применением модели тонкой пластины.

1.*E.I. Moses et al.* J. Phys.: Conf. Ser. 2016. **688**, 012073.

2.*J.-L. Miquel, C. Lion, P. Vivini.* J. Phys.: Conf. Ser. 2016. **688**, 012067.

3.*S.G. Garanin et al.* Quantum Electronics, 2005. **35**(4), 299-301

**Характеризация оптических волноводов,
записанных в фосфатном стекле
методом фемтосекундной лазерной записи**

Д.А. Гурьев¹, Н.Н. Скрыбин²

¹*ИЦМЛТ ИОФ РАН,*

*отдел лазерных кристаллов и твердотельных лазеров,
лаборатория активных сред твердотельных лазеров*

²*Московский физико-технический институт*

E-mail: guryevden@gmail.com

В последнее время опубликовано много работ, посвященных записи оптических волноводов методом фемтосекундной лазерной записи в различных диэлектрических средах, являющихся активными средами твердотельных лазеров [1, 2, 3], с последующим их использованием в схемах волноводных лазеров или усилителей, но не во всех работах указаны характеристики записанных волноводных структур.

Целью данной работы являлось исследование изменения показателя преломления волноводов, записанных с помощью метода лазерной фемтосекундной записи. Волноводы записывались в фосфатном стекле легированном ионами Nd^{3+} (ГЛС-24) с помощью лазера ($\lambda=1040$ нм, $\tau_p=300$ фс) с различными энергиями импульсов (200-400 нДж) и частотой повторения импульсов (100-400 кГц) и представляли собой набор уединенных треков на глубине 0.8 мм на расстоянии 0.1 мм друг от друга.

Исследование характеристик волноводов осуществлялось методом анализа расходимости моды волновода [4]. Данный метод позволяет оценить разницу между показателем преломления сердцевинки волновода и его оболочкой, но данный метод не дает представления о распределении показателя преломления, и для того чтобы более детально исследовать показатель преломления волноводов был использован метод количественной фазовой микроскопии [5], позволяющий с хорошей точностью проводить исследование показателя преломления. Результаты полученные приведенными выше методами дали хорошее соответствие между собой.

Исследование проводилось для установления характеристик волноводов благоприятных для осуществления последующей

генерации в них, а именно, позволяющих осуществить удобный и эффективный ввод излучения накачки, а также поддерживающих распространение основной моды излучения (TEM_{00}).

1. *Morris J. et al.* Opt. Express 2017. **25**, 13.
2. *Lallier E. et al.* Electron. lett. 1989. **25**, 22.
3. *Taccheo S. et al.* Opt. lett. 2004, **26**, 22.
4. *Shah L. et al.* Opt. Express. 2005. **13**, 6, 1999-2006.
5. *Bellair C.J. et al.* J. Microsc. Wiley Online Library, 2004. **214**, 62-69.

**РЕГИСТРАЦИЯ НА УСТАНОВКЕ «ЛУЧ»
ВРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ
ФРОНТА ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА
С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ
И ПИКОСЕКУНДНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ**

И.А. Белов, А.Ю. Воронин, Л.А. Душина,
Д.С. Корниенко, А.Г. Кравченко, Д.Н. Литвин,
К.В. Стародубцев, В.М. Тараканов
*ИОФ РАН, отдел колебаний, лаборатория,
лаборатория лазерной спектроскопии
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров
E-mail: dushinala@gmail.com*

Эксперименты на мощных лазерных установках, связанные с облучением мишеней, в том числе по лазерному термоядерному синтезу, требуют детальной информации о профиле фронта греющего лазерного импульса (ЛИ). В зависимости от его крутизны доля поглощённой лазерной энергии, переработанной в кинетическую энергию оболочки мишени, и определяющая, в конечном счёте, параметры микровзрыва, может изменяться в значительных пределах. В современных установках мегаджоульного уровня энергии требуется измерение профиля фронта ЛИ с динамическим диапазоном не менее 10^6 и высоким временным разрешением ($\tau_p \leq 0.1$ нс) [1]. При регистрации длительности импульса широко применяются осциллографические методы на основе быстродействующих фотодиодов и автокорреляционные методики. Однако, при их использовании не может быть достигнуто сочетание требуемых для указанной задачи значений динамического диапазона, временного разрешения и интервала регистрации. В отличие от них современные щелевые фотохронографы (стрик-камеры) на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) позволяют наблюдать сигнал на развертках $10 \div 20$ нс при сохранении временного разрешения в пределах 100 пс. Динамический диапазон таких регистраторов составляет от 100 до 1000, что само по себе

достаточно далеко от требуемого значения. Кроме того, при классическом применении фотохронографа, можно провести измерение только основного импульса без информации об его пьедестале, а измерение камерой пьедестала может привести к насыщению фотокатода ЭОП или к его разрушению.

В данной работе описан предложенный авторами фотохронографический способ измерения профиля фронта ЛИ с большим динамическим диапазоном [2]. Представлены первые результаты внедрения на установке «Луч» ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ [3] указанного способа регистрации при использовании собранного авторами фотохронографа СЭР-5 [4] и специально созданной оптической схемы диагностики параметров облучения лазерных мишеней [5, 6]. Представлены результаты измерения мощностного контраста ЛИ второй гармоники ($\lambda=527$ нм) установки проведённые в силовых экспериментах, демонстрирующие возможность измерения глубокого профиля импульса с динамическим диапазоном до 10^6 и временным разрешением 70 пс. Предложен способ увеличения диапазона регистрации до 10^{11} за счёт введения дополнительного измерительного канала, позволяющего регистрировать низкие уровни мощности на фронте импульса, и камеры СЭР-5 с ЭОП, имеющим расширенный до величины $10^3 \div 10^4$ динамический диапазон [7].

1. *J.D. Lindl. Phys. Plasmas. 1995, 2, 3933.*
2. *Литвин Д.Н., Кравченко А.Г., Сенник А.В. и др. Патент на изобретение №2587684, Способ регистрации временного профиля фронта светового импульса и устройство его реализации от 02.03.2015г.*
3. *Voronich I.N., Galakhov I.V., Garanin S.G. et al. Quantum Electron. 2003, 33(6), 485.*
4. *Д.С. Корниенко, А.Г. Кравченко, Д.Н. Литвин и др. Приборы и техника эксперимента. 2014, 2, 1-12.*
5. *Горчаков О.И., Душина Л.А., Корниенко Д.С., и др. XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические,*

естественные, математические науки) материалы докладов. 2018.
С. 14-17.

6. *Сенник А.В., Седов Д.С., Улановский М.В.* Патент на изобретение №2620783, Устройство ввода импульсного лазерного пучка в волоконно-оптическую линию связи от 29.05.2017 г.,

7. <http://www.vniia.ru/production/incl/EVP2016NDrus.pdf>

**Импульсно-периодические волоконные лазеры
с внутрирезонаторным модулятором Маха-Цендера**
И.В. Жлуктова¹, В.А. Камынин^{1,2}, В.Г. Воронин³, О.Е. Наний³,
В.Б. Цветков^{1,4}

¹ИЦЛМТ ИОФ РАН,

*отдел лазерных кристаллов и твердотельных лазеров,
лаборатория активных сред твердотельных лазеров*

²Ульяновский государственный университет

³МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

⁴НИЯУ «МИФИ»

E-mail: iv.zhuktova@gmail.com

Волоконные лазеры, работающие в режиме модуляции добротности, спектр излучения которых лежит в широком спектральном диапазоне, имеют перспективы применения в таких областях как медицина, лазерная локация, нелинейная оптика и т.д. [1, 2]. Исследованы полностью волоконные схемы лазеров с модуляцией добротности, предложенные в статье [3]. В качестве активной среды использовались волокна, легированные редкоземельными элементами. Излучение накачки вводилось через волоконную брэгговскую решетку (ВБР) с высоким коэффициентом отражения (99%) и выходным зеркалом, которым являлся коннектор с торцом прямой полировки с коэффициентом френелевского отражения 4%. Так же в резонаторе лазера был расположен полностью волоконный модулятор, созданный по схеме интерферометра Маха-Цендера. Получена импульсно-периодическая генерация для трех волоконных лазеров (иттербиевого, эрбиевого и гольмиевого) с различными длительностями импульсов. Частота следования была 11.2 кГц и 22.4 кГц. На рисунке 1 представлена последовательность импульсов и спектры лазерного излучения для гольмиевого волоконного лазера.

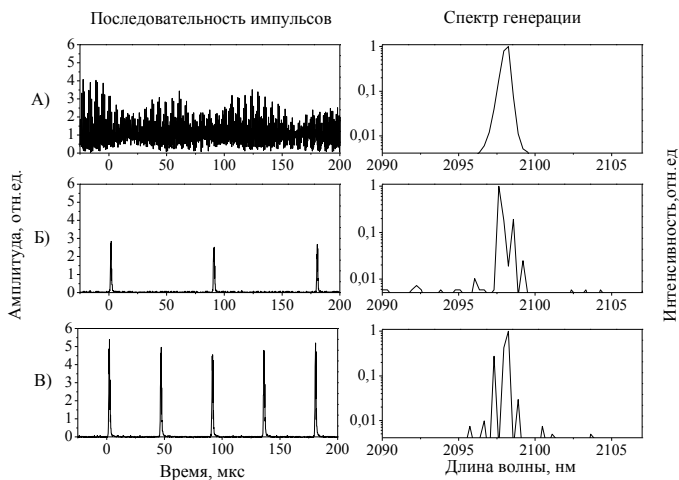


Рис. 1. Последовательности импульсов генерации гольмиевого импульсно-периодического лазера (слева) и спектры лазерного излучения (справа). А – без модуляции при накачке 1.8 Вт; Б – амплитуда напряжения на модуляторе 10 В и накачка 1.8 Вт, В – амплитуда напряжения на модуляторе 10 В и накачка 2.9 Вт.

Исследование было поддержано Российской академией наук в рамках программы «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов» (Проект № I.25П) и Министерством Образования и Науки Российской Федерации (Проект № 14.Z50.31.0015).

1. *I.K. Scholle, S. Lamrini, P. Koopmann et al., Croatia, InTech. 2010, 471-500.*
2. *С.А. Филатова, В.Б. Цветков, А.С. Курков. Прикладная фотоника. 2014, 1, 130.*
3. *В.Г. Воронин, В.А. Камынин. Прикладная фотоника. 2015, 2(2), 135-143.*

**Генерация суперконтинуума
с использованием источников
ультракоротких импульсов двухмикронного диапазона**

В.А. Камынин¹, С.А. Филатова¹, И.В. Жлуктова¹,

В.М. Машинский², В.Б. Цветков^{1,3}

¹НЦЛМТ ИОФ РАН,

*отдел лазерных кристаллов и твердотельных лазеров,
лаборатория активных сред твердотельных лазеров*

²Научный центр волоконной оптики РАН

³НИЯУ «МИФИ»

E-mail: kamyninva@gmail.com

Источники как когерентного, так и некогерентного суперконтинуума (СК) инфракрасного спектрального диапазона все чаще используются в таких областях, как: спектроскопия [1], метрология, телекоммуникация [2, 3], оптическая когерентная томография [4], и т.д. Это привело к необходимости разработки и создания сравнительно простых в использовании и мобильных источников широкополосного импульсного излучения. Полностью волоконные генераторы суперконтинуума, в связи с этим, выглядят наиболее перспективными. В последнее время, значительная часть работ посвящена источникам СК, работающим в спектральном диапазоне 2-3 мкм с высокой плотностью мощности. Кроме того, стоит отметить, что одной из текущих тенденций в генерации суперконтинуума является реализация "плоских" спектров [5, 6] - спектров с минимальной вариацией амплитуды по спектральному диапазону.

Одним из путей решения данной задачи может быть использование импульсных источников на базе оптических волокон, легированных ионами гольмия, так как они позволяют реализовать наибольшие длины волн генерации в волокнах на кварцевой основе. Таким образом, используя различные комбинации таких элементов, как задающий импульсный гольмиевый лазер, гольмиевый усилитель и нелинейные волокна можно получить семейство источников с

различной длинноволновой границей и спектральной плотностью, сохраняя преимущества полностью волоконной схемы.

В текущей работе представлены генераторы СК с использованием полностью волоконного гольмиевого лазера. Импульсная генерация (длительность импульса ~ 1 пс, центральная длина волны ~ 2.1 мкм) реализована, за счет эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации. Для увеличения плотности мощности использовалось несколько каскадов гольмиевых волоконных усилителей с накачкой в сердцевину волокна, а для уширения спектра - нелинейные оптические волокна. Комбинации представленных оптических элементов позволяют получить генерацию СК в спектральном диапазоне от 2 до 2.6 мкм.

На рисунке 1 продемонстрирован спектр суперконтинуума, полученного в линейной схеме задающий генератор-усилитель – нелинейная среда.

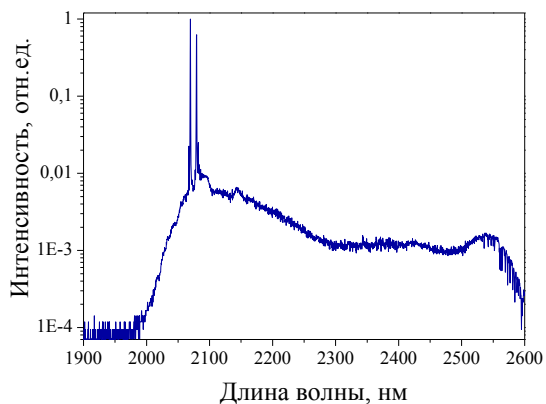


Рис. 1. Суперконтинуум, полученный в линейной схеме.

Таким образом, источники СК, построенные на основе волокон, легированных гольмием позволяют решить ряд задач в спектральном диапазоне 2-3 мкм, при этом сохраняя технологичность ближнего ИК диапазона.

Работа выполнена при поддержке Президиума Российской академии наук в рамках программы фундаментальных исследований № I.7 «Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов».

1. *Rumala Y.S., Dorsinville R., Alfano R.R.* Springer, New York, NY, 2016. 405-424.
2. *Petrovich M.N. et al.* Optics express. 2013. **21**, 23. 28559-28569.
3. *Takara H. et al.* Electronics Letters. 2005, **41**(5), 270-271.
4. *I. Hartl, X.D. Li, C. Chudoba, et al.* Opt. Lett., 2001, **26**, 608-610.
5. *Klimentov D., Tolstik N., Dvoyrin V.V. et al.* Journal of Lightwave Technology, 2016, **34**(21), 4847-4855.
6. *Michalska M., Mikolajczyk J., Wojtas J. et al.* Scientific reports, 2016, **6**, 39138.

Связывание импульсной генерации каналов при продольной сегментированной накачке

Д.Н. Мамонов, С.М. Климентов, С.И. Державин

ИОФ РАН, отдел КиНО, лаборатория МЭТуО,

ОМЛ, лаборатория мощных полупроводниковых лазерных приборов

E-mail: mamonau.dzmitry@kapella.gpi.ru

Объединение излучения нескольких первоначально независимых каналов – универсальный метод повышения энергии и мощности лазерных систем. Представленная работа исследует связывание излучения близкорасположенных каналов генерации в импульсном лазере с пассивной модуляцией добротности [1].

Так в эксперименте наблюдалось, что при достаточно малом, в сравнении с размером моды генерации, расстоянии между каналами и при достаточно близких условиях накачки в каналах происходит связывание их излучения. Этот эффект проявляется в наблюдении двух последовательных импульсов генерации с задержкой по времени от нескольких единиц до нескольких сотен наносекунд, в то время как в независимом режиме генерации эта задержка может составлять несколько десятков микросекунд. Первый импульс играет роль ведущего, а второй – ведомого. В эксперименте исследовалась зависимость от времени задержки для двух каналов в Nd:YAG/Cr:YAG лазере для различных токов накачки в каналах, от расстояния в между центрами областей накачки и от длины резонатора. Было выяснено, что время задержки изменяется предсказуемым образом, что позволяет говорить контролируемой временной задержке между импульсами генерации.

Для описания полученных экспериментальных результатов была разработана расчетно-теоретическая модель анализирующая процесс развития генерации при многопроходном распространении излучения в резонаторе в условиях неоднородного пространственного профиля усиления в двух близкорасположенных областях накачки с учетом изменения усиления в активном элементе

и поглощения в насыщающемся поглотителе. В рамках моделирования было получено достаточно хорошее совпадение эксперимента и расчетных результатов. Это позволяет сделать вывод о том, что ведущую роль в процессе связывания каналов генерации играет перекрытие полей генерации отдельных каналов. Кроме этого в рамках моделирования было обнаружено наличие излучения в ведомом канале на момент генерации ведущего, что позднее было подтверждено и в эксперименте. Так полученная модель могла применяться для рассмотрения процесса связывания каналов для схем различных геометрий.

Полученные экспериментальные и теоретические результаты могут служить основой для технологии создания новых многоканальных импульсных источников лазерного излучения. С одной стороны появляется возможность масштабировать энергию и мощность лазера, достигая минимальной длительности импульсов выходного излучения системы, не превышающей длительности импульса отдельного канала [2]. С другой стороны, открывается возможность генерировать последовательности импульсов с плавно регулируемой временной задержкой в диапазоне от десятков до сотен нс. В [3] описана установка работающая по предложенному принципу. С использованием последней схемы могут быть, так же получены несколько синхронизованных по времени каналов с высокой пиковой мощностью и перестраиваемым спектром.

1. *Mamonov D.N., Klimentov S.M., Derzhavin S.I. et al. Physics of wave phenomena*, 2018, **26**(3), 214-220.
2. *Mamonov D.N., et al. Quantum Electronics*, 2015, **45**(6), 508-511.
3. Патент RU182596U1, Опубл. 23.08.2018, H01S3/1623.

Методы увеличения коэффициента усиления в неодимовых квантронах с диодной накачкой

Б.Д. Овчаренко, В.Х. Багдасаров, Н.А. Кудашева,

В.В. Букин, В.Б. Цветков, С.В. Гарнов

ИОФ РАН, отдел колебаний, лаборатория лазерной спектроскопии

E-mail: bdosport90@mail.ru

Квантроны с диодной накачкой позволяют достигать больших значений коэффициентов усиления при значительной энергетической эффективности (КПД оптической конверсии накачки в выходное излучение может достигать ~ 60%). Поэтому главной задачей является оптимизация как конструктивных элементов квантрона, так и параметров его накачки [1].

При определенных значениях тока накачки в активном элементе квантрона может происходить ограничение коэффициента усиления. Это связано с эффектом насыщения усиления в активной среде, а также с возникновением паразитной генерации. Причем эффект насыщения усиления активной среды возникает, в основном, в малогабаритных активных элементах, где не успевает образовываться паразитная генерация. В более объемных активных элементах значительную роль играет образование паразитной генерации, которая «съедает» значительную часть инверсии населенности. Рассчитать теоретически возникновение паразитного излучения в активной среде при той или иной токовой накачке достаточно проблематично. Поэтому уменьшение влияния вышеперечисленных эффектов на коэффициент усиления в активном элементе является основной задачей при создании мощных квантронов с диодной накачкой, а также является целью данной работы.

При экспериментальном исследовании квантронов с разной модификацией активных элементов и одинаковом энергокладе выработано два основных метода повышения коэффициента усиления:

- метод модификации активного элемента;
- метод оптимизации диодной накачки.

Первый метод, связанный с модификацией активного элемента, заключается в изменении его геометрических и физических параметров. Для уменьшения отражения падающего излучения накачки от боковой поверхности, а также для увеличения однородности засветки вся боковая поверхность матируется до шероховатости Ra 0.8÷1.0 мкм. Так как увеличение габарита длины активного элемента ограничивается технологическими особенностями его выращивания, то для уменьшения влияния паразитной генерации торцы активного элемента закашиваются под определенными углами, а также производят ребрение (для диаметров больше 5 мм) боковой поверхности активного элемента в зоне его накачки. Эти действия позволяют повысить коэффициент усиления квантронов в несколько раз.

Второй метод связан с удельным коэффициентом усиления и направлен на оптимизацию вкладываемой энергии в единицу объема активной среды. Таким образом, производя диодную накачку в разных областях активного элемента, паразитная генерация не успевает повлиять на образование инверсии населенности.

Учитывая все нюансы каждого из метода можно добиться больших удельных коэффициентов усилений при высокой энергетической эффективности.

Исходя из предыдущих доводов, в нашей лаборатории были разработаны несколько типов мощных неодимовых квантронов, коэффициенты усиления которых достигали значений в более ста раз при 92-97% однородности засветки активного элемента.

1.Гречин С.Г., Николаев П.П. Квантовая электроника. 2009. **39**, 1-17.

Спектроскопические свойства оптических центров ионов Tm^{3+}

в кристаллах и керамиках на основе CaF_2

К.А. Пирпоинт, М.Е. Дорошенко, О.К. Алимов

ИЦЛМТ ИОФ РАН,

отдел лазерных материалов и фотоники,

лаборатория лазерной спектроскопии твёрдого тела

E-mail: kmartynova19@gmail.com

Фторидные материалы, активированные ионами Tm^{3+} , благодаря своим свойствам (широкое окно прозрачности от 0.15 до 9 мкм, низкая энергия фононов $\sim 495 \text{ см}^{-1}$, хорошие механические свойства) являются одними из перспективных для получения эффективной генерации вблизи 2 мкм [1]. Одной из ключевых особенностей фторидов является формирование в них различных типов оптических центров активного иона. При малых концентрациях иона-активатора ($< 0.1 \text{ мол.}\%$) формируются одиночные центры. В зависимости от положения межузельного фтора F, компенсирующего избыточный заряд $^{+1}$, возникающий при гетеровалентном замещении катиона решетки (Ca^{2+}) редкоземельным ионом (Tm^{3+}), образуются центры кубической, тетрагональной и тригональной симметрии. При увеличении концентрации активного иона начинают формироваться комплексные (парные Tm-Tm, четверные и т.д.) оптические центры.

Спектроскопические свойства иона в зависимости от локального кристаллического окружения, в котором он находится, могут изменяться весьма существенно. Спектральные и генерационные свойства кристалла в таких многоцентровых системах определяются набором оптических центров, формирующихся в матрице. Управлять центровым составом кристалла можно не только путем увеличения или уменьшения концентрации активного иона, но и легируя кристалл ионами неактивных редких земель (Y^{3+} , La^{3+} , Lu^{3+}). В таких трехкомпонентных твёрдых растворах есть также вероятность

формирования новых центров с новыми свойствами. Кроме того, недавно было обнаружено формирование новых оптических центров активного иона и в керамиках, полученных методом «горячего формования» из соответствующих монокристаллов [2].

Исследование влияния локального окружения на свойства оптических центров RZ^{3+} ионов в твёрдых растворах фторидов и фторидных керамиках важно и актуально как с точки зрения получения генерации на новых длинах волн, так и для оптимизации химического состава активных элементов твердотельных лазеров. Твёрдые растворы фторидов и фторидные керамики обладают лучшими механическими свойствами, при этом, не уступая монокристаллам в оптическом качестве. Природа образования и спектроскопические свойства различных одиночных и кластеризованных оптических центров в твёрдых растворах и керамиках практически не изучены. Задача выделения индивидуальных спектров тех или иных центров является весьма сложной. Для её решения исследуются серии кристаллов с различным содержанием активной и неактивной примесей, применяются методы низкотемпературной время-разрешённой лазерной спектроскопии при селективном возбуждении различных оптических центров.

В кристаллах $CaF_2:Tm^{3+}$ с помощью упомянутых выше методов на переходе $^3F_4-^3H_6$ удалось выделить спектры люминесценции и измерить время жизни трёх типов оптических центров – кластеризованных ($\tau \sim 5$ мс), тетрагональных ($\tau \sim 20$ мс) и высокосимметричных долгоживущих ($\tau \sim 100$ мс). В кристаллах с концентрацией активатора более 0.4 мол.% была получена генерация на двух длинах волн вблизи 2 мкм, одна из которых совпадает с пиком спектра люминесценции нового «долгоживущего» центра [4].

В недавних исследованиях кристаллов твёрдых растворов $CaF_2-YF_3:Tm^{3+}$ даже при малой концентрации неактивной примеси (0.1 мол.%) в исследованных спектрах не было обнаружено линий,

принадлежащих тетрагональным оптическим центрам иона тулия. В то же время в кристаллах $\text{CaF}_2\text{-YF}_3\text{:Tm}^{3+}$ наблюдается спектр люминесценции центров, аналогичных «долгоживущим» в кристаллах $\text{CaF}_2\text{:Tm}^{3+}$, но с более долгим временем жизни (более 150 мс). Также в нем формируются аналогичные кластеризованные Tm-Tm и новые кластеризованные Tm-Y оптические центры. Времена жизни всех обнаруженных кластеризованных центров близки, но превышают таковое для кристаллов $\text{CaF}_2\text{:Tm}^{3+}$ в два-три раза (11-14 мс).

В новых кристаллах $\text{CaF}_2\text{-LuF}_3\text{: Tm}^{3+}$ (0.1 мол.%) с различным содержанием Lu^{3+} (0.1 до 4 мол.%) была обнаружена вероятность образования оптических центров иона тулия, аналогичным классическим тетрагональным, и ряд кластеризованных центров. Времена жизни всех обнаруженных центров также превышают те, что были получены для оптических центров иона тулия в кристаллах $\text{CaF}_2\text{:Tm}^{3+}$. Более долгое время жизни кластеризованных центров на верхнем лазерном уровне может способствовать накоплению инверсной населенности и, тем самым, улучшить генерационные свойства кристалла.

Дальнейшие исследования предполагают получение двухмикронной генерации на кристаллах с Y^{3+} и Lu^{3+} и изучение генерационных свойств этих кристаллов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00080 мол а.

1. *Camy P. et al. Optics Communications. 2004, 236, 395-402.*
2. *Doroshenko M.E., Papashvili A.G., Martynova K.A. et al. Laser Physics Letters. 2016, 13 (1), 015701 (4 pp.).*
3. *Doroshenko M.E., Alimov O.K., Papashvili A.G. et al. Laser Physics Letters. 2015, 12, 125701 (6 pp.)*

Волноводный Nd:YAG лазер

с ГГц частотой повторения ультракоротких импульсов

**М.В. Понарина, А.Г. Охримчук, М.Г. Рыбин, Т.В. Долматов,
В.В. Букин, И.В. Жлуктова, В.А. Камынин, П.А. Образцов**
ИОФ РАН, отдел колебаний, лаборатория лазерной спектроскопии
E-mail: ponarinamariya@gmail.com

В настоящее время особое внимание привлекают лазерные источники, обеспечивающие генерацию ультракоротких импульсов (УКИ) с высокой частотой повторения (более 1 ГГц) [1]. Высокостабильные генераторы частоты применяются в таких направлениях, как метрология частоты, телекоммуникации и фундаментальные исследования.

При разработке данных лазеров одной из ключевых проблем является повышение и контроль стабильности частоты следования УКИ.

Для стабилизации синхронизации продольных мод, необходимо обеспечить генерацию на основной поперечной моде (TEM_{00}). В данной работе представлен твердотельный лазер, обеспечивающий генерацию <20 пс импульсов с гигагерцовой частотой повторения. В качестве активной среды используется трубчатый волновод с диаметром 30 мкм, созданный в объеме кристалла Nd:YAG [2]. Накачкой служит Ti-Sa лазер с длиной волны 808 нм (600 мВт). Резонатор волноводного лазера образован глухим зеркалом, нанесенным на один из торцов кристалла, и выходным зеркалом с насыщающимся поглотителем на основе графена. Длина резонатора составляет 8.4 мм, что обеспечивает частоту повторения импульсов 9.8 ГГц.

В ходе эксперимента выходное зеркало было оснащено пьезоэлектрическим элементом. Изменяя длину резонатора с шагом 0.04 мкм, наблюдаются различные режимы генерации лазера: либо на длине волны 1061 и 1064 нм одновременно, либо только на 1064 нм. Этот процесс объясняется формированием интерферометра

Фабри-Перо между торцом кристалла и выходным зеркалом внутри резонатора.

Таким образом, в волноводном Nd:YAG лазере была получена синхронизация мод одновременно на двух длинах волн 1061 и 1064 нм. Однако одновременная генерация на двух длинах волн препятствует достижению стабильной частоты повторения лазерных импульсов в режиме синхронизации мод. Для стабилизации режима работы лазера было предложено использование узкополосного спектрального фильтра, обеспечивающего выделение генерации на одной из длин волн для последующего усиления сигнала в волоконном Yb усилителе. Благодаря такому подходу, на длине волны 1061 нм была получена стабильная гребенка импульсов с длительностью <20 пс и частотой повторения 9.8 ГГц.

1. *H. Hu, F. Da Ros, M. Pu et al. Nat. Photonics*, 2018, **12**, 469-473

2. *A.G. Okhrimchuk and P.A. Obraztsov, Sci. Rep.*, 2015, **5**, 11172.

**Перспективные активные волоконные среды
для источников излучения С-диапазона**

Б.И. Галаган¹, Б.И. Денкер¹, В.А. Камынин¹, А.А. Поносова¹,
С.Е. Сверчков¹, С.Л. Семенов², В.Б. Цветков^{1,3}

¹ИОФ РАН,

*отдел лазерных кристаллов и твердотельных лазеров,
лаборатория активных сред твердотельных лазеров*

²НЦВО РАН

³НИЯУ «МИФИ»

E-mail: nastya-aleksi@mail.ru

Волоконные источники излучения в области 1525-1565 нм являются одним из наиболее значимых практических достижений науки, возникшим на стыке волоконной оптики и лазерной физики. Их широкое применение обусловлено наличием подходящей активной среды - кварцевых оптических волокон, легированных Er^{3+} , и низкими потерями в волокне в этом диапазоне длин волн.

Однако предельная растворимость ионов эрбия в кварцевой матрице ограничена концентрацией порядка 0.1 вес.%. Поэтому в волоконных источниках используются активные волокна длиной до нескольких десятков метров, что приводит к возникновению нежелательных нелинейных эффектов при усилении импульсного излучения.

Многочисленные работы последних двадцати лет посвящены исследованию оптических волокон из лазерных фосфатных стекол, позволяющих вводить концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) на порядок выше, чем кварцевые стекла. Несмотря на то, что в ряде работ продемонстрированы хорошие усиливающие свойства фосфатных волокон, их широкое использование в приборостроении не предвидится. Основная проблема заключается в различии физических свойств фосфатных световодов с кварцевыми, препятствующем изготовлению цельно-волоконных устройств.

В ИОФ РАН совместно с НЦВО РАН разработаны композитные световоды с сильнолегированной ионами РЗЭ

фосфатной сердцевинной в кварцевой оболочке, что позволяет решить вышеописанные задачи волоконной оптики.

Цель настоящей работы заключалась в оценке возможности применения композитных световодов для создания волоконных источников излучения в области 1525-1565 нм.

Исследованные композитные световоды отличались содержанием РЗЭ в фосфатной сердцевине и её геометрическими параметрами (Таблица 1). Разность показателей преломления между сердцевинной и оболочкой составляла порядка 0.035.

Таблица 1- Экспериментальные образцы

Параметр	Волокно№1	Волокно№2	Волокно№3
Er ³⁺ , вес. %	1.3	1	3
Yb ³⁺ , вес. %	17.3	-	-
d _{core} , мкм	12±1.5	3.3	4.5

С применением экспериментальных образцов активных световодов реализованы цельно-волоконные широкополосные источники излучения, непрерывные волоконные лазеры и усилители непрерывного сигнала. Для накачки Er³⁺/Yb³⁺ волокон излучение от многомодового лазерного диода на 971 нм мощностью до 7.2 Вт вводилось в световедущую оболочку, тогда как инверсия населенности в Er³⁺ волокнах создавалась с помощью одномодового источника накачки с длиной волны 975 нм и мощностью до 660 мВт. Исследованы спектральные, мощностные и амплитудно-временные характеристики устройств.

В однопроходных суперлюминесцентных волоконных источниках (СВИ) со встречной накачкой получено широкополосное излучение для волокон, легированных ионами эрбия и системой эрбий-иттербий. Спектры излучения в обоих случаях имели сложную форму с двумя пиками на длинах волн 1535 нм и 1543 нм и шириной на полувысоте порядка 2 нм и 5 нм, соответственно. Дополнительное легирование фосфатной сердцевинны ионами иттербия не оказало влияния на форму спектров и диапазон излучения СВИ. Максимальная выходная мощность составила ~30 мВт в образце #3,

тогда как использование мощного диода при накачке $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ волокна позволило увеличить выходную мощность до 100 мВт.

Непрерывная лазерная генерация на длине волны 1535 нм получена для образца, легированного 3 вес.% Er^{3+} . Максимальная выходная мощность составила 105 мВт при длине активного световода всего 15 см. Дифференциальная эффективность по отношению к поглощенной мощности накачки с учетом потерь на сварках (от 0.12 до 1.1 дБ) достигала порядка 38 %.

В отрезке $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ волокна длиной 36 см продемонстрирована возможность получения более высокой выходной мощности непрерывной лазерной генерации (до 392 мВт) за счет накачки в оболочку в полосу поглощения ионов иттербия. Однако увеличенный диаметр сердцевинки значительно ухудшил сварку с кварцевыми световодами (потери на сварке от 1.7 до 3 дБ). Отражения на сварке и наличие нескольких поперечных мод на рабочей длине волны привели к нестабильности спектральных характеристик лазерной генерации. Исследования усиления непрерывного сигнала на длине волны 1550 нм в $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ волокнах также продемонстрировало отрицательное влияние многомодового режима на коэффициенты усиления. Максимальный коэффициент усиления в том же образце составил 13.5 дБ для входного сигнала мощность 0.37 мВт, уровень усиленного спонтанного излучения при этом был меньше сигнала на 10 дБ.

Для обоих Er^{3+} световодов с накачкой в сердцевину получены высокие коэффициенты усиления непрерывного слабого сигнала на длине волны 1535 нм порядка 38-39 дБ при длинах волокон 20 см (3 вес.%) и 50 см (1 вес.%). Получено усиление на единицу длины 3.1 дБ/см в 10-см световоде, легированном 3 вес.% Er. Подавление усиленного спонтанного излучения составляло более 20 дБ при мощности усиливаемого сигнала 1 мкВт.

Благодаря уникальной конструкции композитных световодов реализованы цельно-волоконные источники излучения с

применением стандартных волоконных компонентов и оборудования. Высокая концентрация ионов РЗЭ позволила на порядок сократить длину активных световодов в исследованных типах устройств.

Показано, что разработанные Er^{3+} световоды наиболее перспективны для использования в усилителях слабого сигнала и волоконных лазерах, требующих короткую длину резонатора. Вместе с тем, увеличить мощностные характеристики устройств за счёт применения накачки в оболочку в полосу поглощения иттербия затруднено как с точки зрения поддержания одной поперечной моды, так и получения низких потерь на сварках.

Авторы выражают благодарность Ольге Николаевне Егоровой за предоставленные световоды. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-01010.

**Люминесцентные свойства наноалмазов,
помещенных в микрорезонатор Фабри-Перо**
А.М. Ромшин, И.И. Власов, О.С. Кудрявцев, Д.Г. Пастернак
ЦЕНИ ИОФ РАН, ОСПЯ,
лаборатория углеродной нанофотоники
E-mail: alex_31r@mail.ru

В последнее десятилетие интенсивно развивается направление по созданию твердотельных источников одиночных фотонов на основе люминесцирующих примесных центров в кристаллах. Наиболее перспективными источниками одиночных фотонов являются примесные центры в алмазных кристаллах. Благодаря широкой запрещенной зоне алмаза (5.4 эВ) многие примесные дефекты в нем являются оптически активными, то есть имеют электронные переходы в видимой области спектра. На этих переходах может происходить поглощение и испускание света. Оптически активные дефекты называют центрами окраски. Наиболее интенсивно разрабатываемыми в настоящее время являются центры "азот-вакансия"(NV) и "кремний-вакансия"(SiV). За счет высокого квантового выхода люминесценции и ее фотостабильности при комнатной температуре, а также возможности контроля спинового состояния дефекта по его люминесценции, эти центры являются перспективными для применения в квантово-информационных технологиях, спинтронике, квантовой оптике. Однако, для практического применения алмазных источников одиночных фотонов требуется решить задачу увеличения скорости спонтанного излучения святящихся центров, чего можно достичь путем помещения их в микрорезонатор. В таком случае континуум возможных состояний поля, то есть плотность осцилляторов, изменяется и

скорость излучения увеличивается. Описанный выше эффект носит имя Парселла и количественно характеризуется фактором Парселла F_p , представляющим отношение скоростей излучения в и вне микрорезонатора:

$$F_p = \frac{3\lambda_c^3 Q}{4\pi^2 V} \quad (1)$$

здесь λ_c – длина волны перехода, Q – добротность резонатора, V – эффективный модовый объем.

Для экспериментального исследования люминесцентных свойств наноалмазов с примесными центрами в данной работе используется плоскосферический микрорезонатор Фабри-Перо концентрического типа, селекция мод в котором определяется выражением:

$$v_{qmn} = \frac{c}{2L} \left(q + \frac{1}{\pi} (|m| + 2n + 1) \arccos \left(\sqrt{1 - \frac{L}{2R}} \right) \right) \quad (2)$$

Выражение для модового объема имеет следующий вид:

$$V_{eff} = \frac{\pi \omega_0^2}{4} L_{eff} \quad (3)$$

где ω_0 – перетяжка пучка в минимуме каустической поверхности, L_{eff} – эффективная длина резонатора.

Добиваясь высоких значений добротности и малых значений модового объема можно существенно увеличить скорость спонтанного излучения наноалмаза, помещенного в перетяжку резонатора.

В работе решались следующие задачи:

- разработка микро-резонатора Фабри-Перо.
- Тестирование системы "люминесцирующий алмаз в плоскосферическом резонаторе Фабри-Перо" с помощью алмазных кристаллитов размером менее 1 мкм. Определение основных

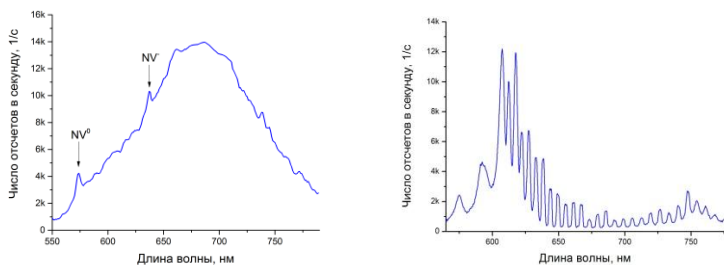
параметров микрорезонатора: добротность (Q) и коэффициент усиления Парселла (F_p).

Для возбуждения широкополосной люминесценции используется твердотельный лазер с излучением на длине волны 532 нм. Первое («выходное») зеркало микрорезонатора имеет коэффициент отражения $R=99.9\%$ в области длин волн $630\div 730$ нм и представляет собой сферическую часть микрорезонатора. На его поверхности в виде двумерного массива располагаются полусферические выемки двух различных радиусов кривизны и глубин: $R=18.45$ мкм, $h=2.47$ мкм и $R=4.61$ мкм, $h=0.62$ мкм. Второе зеркало («глухое») имеет $R=99.995\%$ в диапазоне $630\div 730$ нм и располагается на трехкоординатной пьезоподвижке с диапазоном смещения $\Delta=80$ мкм вдоль каждого направления. На «глухое» зеркало наносятся отдельные алмазные кристаллики из водной суспензии. Излучение накачки фокусируется с помощью объектива на одном из кристалликов, возбуждая в нем люминесценцию, которая усиливается в резонаторе и, вновь проходя через объектив, попадает в систему регистрации. Последняя представляет собой две собирающих линзы, монохроматор и лавинный фотодиод.

Измерения проводились с алмазными кристаллитами различного размера, синтезированными НРНТ-методом. Характерный спектр люминесценции исследуемого кристаллита показан на рисунке 1а. В спектре наблюдаются линии люминесценции нейтрально и отрицательно заряженных центров азот-вакансия (NV^0 и NV^-). Когда исследуемый кристаллит находится в плоскосферическом микрорезонаторе, его спектр люминесценции меняется, как показано на рис. 1б. В области высокого отражения выходного зеркала умещается четырнадцать резонансов с периодом около 7 нм.

В ходе выполнения работы продемонстрирована возможность усиления спонтанной эмиссии NV-центров в алмазных кристаллитах размером ~ 1 мкм, помещенных в микрорезонатор Фабри-Перо,

проведены оценки параметров резонатора и расчет коэффициента Парселла. Полученные значения F_p возрастают с уменьшением размера кристаллика. Для увеличения фактора Парселла необходимо повышать добротность резонатора и уменьшать эффективный модовый объем. Достичь этого можно путем уменьшения радиуса кривизны сферического углубления выходного зеркала, а также использования алмазных кристаллитов меньшего размера.



а)б)

Рис. 1. а) спектр люминесценции алмазного кристаллита размером $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ в свободном пространстве; б) спектр люминесценции в резонаторе

1. *E.M. Purcell*. Physical Review, 1946, **69**, **681**, 252001.

2. *Н. Каурп, Т. Хуммер, М. Мадер et al.* Phys. Rev. Applied, 2016. **6**, 054010.

Пассивная гармоническая синхронизация мод в эрбиевом волоконном лазере

А.И. Трикшев, В.А. Камынин, В.Б. Цветков

ИЦЛМТ ИОФ РАН,

*отдел лазерных кристаллов и твердотельных лазеров,
лаборатория активных сред твердотельных лазеров*

E-mail: trikshevpi@gmail.com

В последние годы во многих областях науки и технологии находят применение лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) высокой частоты, благодаря таким качествам, как высокая оптическая эффективность, широкий диапазон рабочих параметров, масштабируемость. В оптической метрологии и молекулярной спектроскопии высокостабильные лазерные системы УКИ позволяют получать данные с улучшенным отношением сигнал-шум, таким образом уменьшая время измерения. Такие системы подходят и для систем навигации, где требуются высокоточные стандарты частоты, и для системы высокоскоростной передачи данных. Особое место такие источники занимают в радиофотонике. Данное направление является мощным стимулом для развития целых разделов фотоники: высокостабильных непрерывных и импульсных лазеров, в том числе фемтосекундных, фотоприемников, волоконных фильтров, фотонных аналого-цифровых преобразователей для частот более 10 ГГц.

Существует несколько способов создания таких лазерных систем: использование твердотельных или полупроводниковых лазеров с коротким резонатором [1], использование микрорезонаторов [2], использование лазерных систем с гармонической синхронизацией мод. Под гармонической синхронизацией мод понимается такой режим работы лазера, при котором в резонаторе одновременно существуют несколько импульсов с равными временными интервалами.

Синхронизация мод может быть получена несколькими способами:

- использование насыщающихся поглотителей (SESAM или углеродные нанотрубки) [3],

- использование эффекта нелинейного вращения поляризации (NPR) [4],

- использование нелинейных волоконных зеркал [5].

В нашей работе продемонстрирован импульсный кольцевой волоконный лазер, работающий в режиме пассивной гармонической синхронизации мод на основе эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации. В качестве активной среды использовалось эрбиевое волокно длиной 1 м. Накачка осуществлялась лазерным диодом с длиной волны 1461 нм. Мощность диода накачки варьировалась в диапазоне от 30 до 180 мВт. Общая длина резонатора, с учетом линии задержки на SM-волокне, составляла 2.4 м, что обеспечивало частоту повторений импульсов на основной гармонике в 84 МГц. Гармоническая синхронизация достигалась путём тщательной настройки контроллеров поляризации и оптимизации мощности накачки.

На рисунке 1 показаны осциллограммы выходных импульсов. Максимальная рабочая частота составляла 5.62 ГГц, что соответствовало 67-й гармонике.

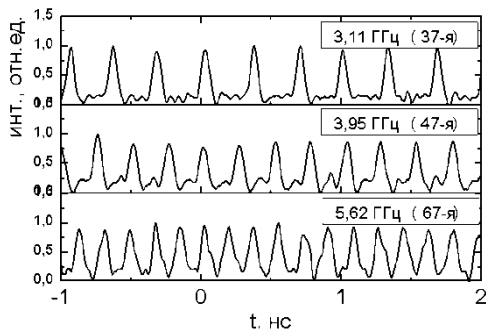


Рис. 1. Осциллограммы выходных импульсов

Режимы можно было объединить в серии, которые характеризовались стабильной работой на одинаковых длинах волн. При этом была возможность перестройки лазера на разные

гармоники в пределах одной серии. Длительность импульсов изменялась в диапазоне от 0.8 до 1.8 пс. Замечено, что при переходе на высокие гармоники длительность импульса увеличивалась, а ширина спектра генерации уменьшалась.

Работа выполнена при поддержке Президиума Российской академии наук в рамках программы фундаментальных исследований № I.7 «Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов».

1. *U. Bandelow, M. Radziunas, A. Vladimirov et al.* Opt Quant Electron. 2006, **38** 495.
2. *T.J. Kippenberg, R. Holzwarth, S.A. Diddams.* Science 2011, **332** (6029), pp. 555-559.
3. *J. Sotor, G. Sobon, W. Macherzynski, K.M. Abramski,* Laser Phys. Lett. 2014, **11**,055102.
4. *J. Peng, L. Zhan, S. Luo, Q. Shen, J.* Lightw. Technol. 2013, **31**, 3009-3014.
5. *H.R. Chen, K.H. Lin, et al.* Opt. Lett. 2013, **38**, 845-847.

Широкополосная широкоапертурная двумерная визуализация объектов в терагерцовой области частот с применением различной обработки данных

А.А. Ушаков, П.А. Чижов, В.В. Букин

ИОФ РАН, отдел колебаний, лаборатория лазерной спектроскопии

E-mail: ushakov.aleksandr@physics.msu.ru

Начиная с 1995 года, активно исследуются различные методики по визуализации в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот [1]. Визуализация с применением импульсных источников и электрооптического детектирования позволяет производить анализ временной формы импульсов ТГц поля и извлекать информацию о задержке и фазовом сдвиге для компонент ТГц поля в исследуемом объекте [2-4]. В данной работе мы применяем широкоапертурную широкополосную ТГц визуализацию прозрачных объектов в просвечивающей геометрии с отображением предметной плоскости для повышения скорости визуализации по сравнению с растровой визуализацией.

Источником оптического излучения служил титан-сапфировый лазер (центральная длина волны 775 нм, частота следования импульсов 10 Гц, длительность импульсов 150 фс, энергия импульсов 2.8 мДж, диаметр Гауссова пучка 12 мм по уровню $1/e^2$, горизонтальная поляризация). Основная часть излучения использовалась для генерации ТГц излучения в источнике, основанном на оптическом выпрямлении фемтосекундных импульсов с наклонным фронтом интенсивности в кристалле ниобата лития [5]. ТГц излучение из источника коллимировалось с помощью тефлоновой линзы с фокусным расстоянием 10 см. Изучаемый объект внедрялся в пучок, впоследствии этот объект отображался на поверхность широкоапертурного кристалла теллурида цинка ($10 \times 10 \times 0.5$ мм³) с помощью тефлоновой линзы с фокусным расстоянием 6 см. Вторая часть лазерного излучения (пробный пучок) пропусклась через линию задержки,

четвертьволновую пластинку, фильтры и расширяющую пучок линзу. Затем ТГц и оптический пучки совмещались на пленочном светоделителе и направлялись в кристалл теллурида цинка. Поверхность детектирующего кристалла отображалась с помощью телескопа на цифровую камеру. До телескопа в пробный пучок внедрялся поляризатор. Присутствие ТГц поля в кристалле теллурида цинка вызывало изменение яркости изображения кристалла на цифровой камере вследствие линейного электро-оптического эффекта [6].

Из полученных изображений кристалла ZnTe на цифровой камере фоновые (ТГц пучок пропускался через свободное пространство) и сигнальные (ТГц пучок пропускался через исследуемый объект) пространственно-временные распределения ТГц были получены. Затем проводилась последующая обработка трехмерных пространственно-временных распределений ТГц поля тремя различными способами: (1) по детектированию смещения положения максимума ТГц импульса вследствие фазовой задержки в изучаемом объекте; (2) путем использования анализа кросс-корреляционной функции между сигнальными и фоновыми временными формами; (3) с помощью последующим извлечением разницы фаз для каждой частотной компоненты ТГц спектра. Пример одного изображения тестового объекта (буква π , вырезанная из тефлонового листа толщиной 1 мм) представлен на рисунке 1.

В итоге были проанализированы ключевые параметры применяемых техник: уровень шума, контраст и пространственное разрешение. Уровень шума для прямой времяпролетной и кросс-корреляционной визуализации определялся как ошибка в определении задержки в области отсутствия объекта. Для фазовой визуализации мы определяли уровень шума как среднеквадратичное отклонение пересчитанной в величины задержки разности фаз для каждой частотной составляющей между фоновым и сигнальным импульсами. Контраст изображений определялся как отношение

средней задержки с объектом и без него рядом с его границей. Для трех разных техник в порядке их упоминания в работе уровень шума составлял (в пикосекундах) 0.06, 0.015, 0.075; контраст 14, 80, 6; пространственное разрешение (в микрометрах) 300, 300 и 700 соответственно. Таким образом, можно видеть, что наибольшее преимущество предоставляет времяпролетная визуализация, основанная на анализе кросс-корреляционной функции, однако остальные методики также могут быть использованы для визуализации прозрачных фазовых объектов в ТГц диапазоне частот.

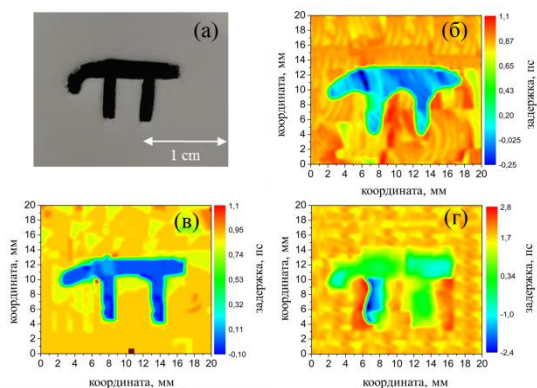


Рис. 1. Вырезанный из тefлоновой пластины толщиной 1 мм символ л. Пример визуализации объекта (а) с применением времяпролетной (б), кросс-корреляционной (в) и фазовой (для частоты 650 ГГц) методик (г).

1. Zhang X.-C., Xu J. «Introduction to THz wave photonics», Springer 2010.
2. Zhang L., Zhang Y., Zhang C. et al. Opt. Lett. 2006, **31**, 3668
3. Mittleman D.M., Hunsche S., Boivin L. Et al. Opt. Lett., 1997, **22**, 904-906
4. Johnson J.L., Dorney T.D., Mittleman D.M., Appl. Phys. Lett., 1997, **78**, 835-837
5. Hebling J., Yeh K.-L., Hoffmann M.C., et al. J. Opt. Soc. Am. B, 2008, **25**, B6–B19.
6. Rice A., Jin Y., Ma X.F. et al. Appl. Phys. Lett., 1994, **64**, 1324.

Сравнение режимов синхронизации мод в гольмиевом волоконном лазере

С.А. Филатова¹, В.А. Камынин¹, Н.Р. Арутюнян^{2,3},
А.С. Пожаров², Е.Д. Образцова^{2,4}, В.Б. Цветков^{1,3}

¹ИЦЛМТ ИОФ РАН,

*отдел лазерных кристаллов и твердотельных лазеров,
лаборатория активных сред твердотельных лазеров*

²ЦЕНИ ИОФ РАН, ОСПЯ,

лаборатория спектроскопии наноматериалов

³НИЯУ «МИФИ»

⁴*Московский физико-технический институт (государственный
университет), МФТИ*

E-mail: filmsim2910@gmail.com

Много внимания уделяется исследованию и развитию волоконных лазеров, генерирующих ультракороткое излучение в спектральном диапазоне более 2 мкм. Интерес к этим источникам обусловлен широкой областью их возможных применений. Среди кварцевых волокон наибольшие длины волн генерации в двухмикронном спектральном диапазоне позволяют получить волокна, легированные ионами гольмия (Ho^{3+}) [1]. Режим синхронизации мод в импульсных гольмиевых волоконных лазерах в основном реализован за счет медленных насыщающихся поглотителей, таких как: углеродные нанотрубки [2], графен [3], полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглотителем (SESAM) [4]. Однако, исходя из работ, посвященных эрбиевым и тулиевым волоконным лазерам, для достижения самозапуска лазера и стабильной генерации коротких импульсов следует использовать гибридную синхронизацию мод, основанную на совместном использовании медленного насыщающегося поглотителя и быстрого поглотителя, основанного на нелинейном эффекте Керра (нелинейное вращение плоскости поляризации) [5].

В данной работе мы сравниваем режимы синхронизации мод в гольмиевом волоконном лазере, основанные на нелинейном

вращении плоскости поляризации (НВП) [6], и на совместном действии НВП и насыщающегося поглотителя на основе одностенных углеродных нанотрубок.

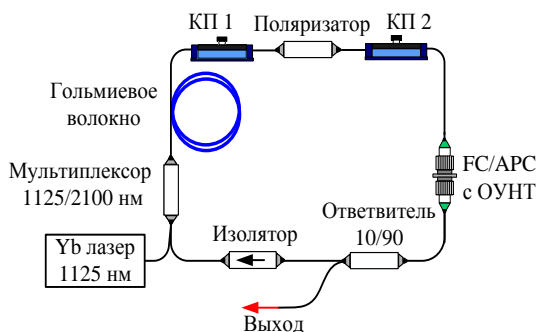


Рис. 1 Схема гольмиевого волоконного лазера с гибридной синхронизацией мод. КП1, КП2 – контроллеры поляризации, ОУНТ – одностенные углеродные нанотрубки.

На рисунке 1 представлена оптическая схема гольмиевого волоконного лазера с гибридной синхронизацией мод. Накачка гольмиевого лазера осуществлялась непрерывным излучением от иттербиевого волоконного лазера на длине волны 1125 нм через мультиплексор 1125/2100 нм. Кольцевой резонатор, длиной около 14 м состоял из гольмиевого волокна, длиной около 6 м, и одномодового волокна Corning SM-332. Волоконный поляризатор и пара контроллеров поляризации использовались для реализации синхронизации мод за счет НВП, так называемого быстрого поглотителя. В качестве медленного насыщающегося поглотителя использовались одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), нанесенные на полимерную пленку, которая фиксировалась между двумя угловыми разъемами. Волоконный ответвитель 10/90 использовался в качестве вывода лазерного излучения. Схема гольмиевого лазера с синхронизацией мод за счет НВП отличалась лишь отсутствием пленки с ОУНТ между оптическими разъемами.

Таким образом, при сравнении режимов синхронизации мод получены следующие параметры излучения, указанные в Таблице 1:

Таблица 1

	НВПП	Гибридная синхронизация мод
$\lambda_{ц}$, нм	2072	2082
Ширина спектра на полувысоте, нм	3.7	3.3
Частота следования, МГц	14.9	14.9
Длительность импульса, пс	1.2	1.4
$\langle P \rangle$, мВт	6.4	4.7
Рпик, Вт	358	220
Энергия, нДж	0.4	0.3

Проведено сравнение спектральных и временных параметров лазерного излучения, изучен вопрос стабильности лазерной генерации, а также показана возможность увеличения частоты следования импульсов до 124 МГц.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН в рамках программы фундаментальных исследований № I.7 «Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов», Российского научного фонда (РНФ) - проект 14-22-00243.

1. *Hemming A., Simakov N. et al.* Optical Fiber Technology 2014, **20(6)**, 621-630.
2. *Chamorovski A.Y., Marakulin A.V. et al.* Laser Phys. Lett. 2012, **9(8)**, 602-606.
3. *Sotor J., Sobon M. et al.* Optics letters 2016, **41(11)**, 2592-2595.
4. *Tolstik N., Sorokin E. et al.* in Mid-Infrared Coherent Sources (pp. MM6C-4), Optical Society of America (2016);
5. *Chernysheva M.A., Krylov A.A. et al.* Ieee journal of selected topics in quantum electronics 2014, **20(5)**, 425-432.
6. *Filatova S.A., Kamynin V.A. et al.* Laser Physics Letters 2016, **13(11)**, 115103.

**Исследование многочастотной генерации лазера на
кристалле Nd:YAP с диодной накачкой**
Г.В. Шилова, И.В. Смирнов, П.Г. Зверев, А.А. Сироткин
ИОФ РАН, ОЛМФ, лаборатория рамановские лазеры
E-mail: shilova@lst.gpi.ru

В настоящее время большой интерес представляют работы по созданию эффективных, надежных и компактных источников терагерцевого излучения. Одним из перспективных путей получения терагерцевого излучения является использование двухчастотных лазеров с последующей генерацией разностной частоты в нелинейных кристаллах [1]. Существует три способа для реализации двухчастотной генерации: внесение в резонатор дополнительных спектрально-селективных потерь, управление усилением активной среды и использование двойного резонатора с поляризационным разделением излучения по спектральным компонентам [2]. В настоящей работе предлагается использовать кристалл Nd³⁺:YAP для создания многочастотного лазера.

В ионах Nd³⁺ в анизотропном кристалле YAP на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ наблюдаются три интенсивные линии люминесценции на длинах волн 1064, 1072 и 1079 нм. Их интенсивность изменяется в зависимости от ориентации кристалла. Максимальное сечение усиления в кристалле Nd³⁺:YAlO₃ достигается при ориентации вдоль оси **b** с поляризацией **E**//**c** ($\sigma = 4.7 \times 10^{-19} \text{ см}^2$) на длине волны излучения 1079.5 нм. Коммерческие кристаллы обычно вырезаются именно в данном направлении. Исследование зависимости спектров люминесценции в зависимости от поляризации регистрируемого излучения показали, что при переходе от **E**//**c** до **E**//**a** интенсивности пиков на длинах волн 1079.5, 1072.6 и 1064.5 нм заметно изменяются. При этом при повороте кристалла на угол 80° от оси **c** наблюдается одинаковая интенсивность линий люминесценции на всех трех спектральных компонентах. Это свидетельствует, что при такой ориентации активного элемента в лазере при одинаковых

внутрирезонаторных потерях на трех длинах волн будет примерно одинаковый коэффициент усиления и может наблюдаться многочастотная генерация.

В работе был создан и исследован твердотельный лазер на кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$ с диодной накачкой, работающий в непрерывном режиме. Лазер состоял из входного зеркала с радиусом кривизны 500 мм и выходных плоских зеркал с пропусканием от 2 до 20%. Внутрирезонаторная фазовая пластинка $\lambda/2$ позволяла контролировать поляризацию генерируемого излучения и вносить спектрально селективные потери. Выходная мощность лазера достигала 1.8 Вт при мощности накачки 6.7 Вт, дифференциальный КПД лазера достигал 33%. На рисунке 1 представлен спектр трехчастотной генерации $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$ с диодной накачкой. Заметим, что при вращении фазовой пластинки наблюдалось переключение между комбинациями двухчастотной генерации 1064+1072, 1072+1079 и 1064+1080 нм. Генерация разностной частоты излучения такого лазера позволит получить терагерцовое излучение с переключением частот 2.103, 2.072 и 4.174, соответственно.

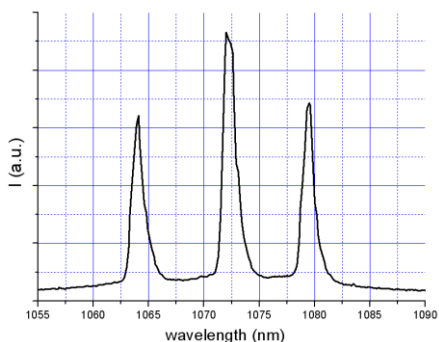


Рис. 1. Спектр трехчастотной генерации $\text{YAP}:\text{Nd}$ лазера

1. Сироткин А.А., Гарнов С.В., Власов В.И. и др. Квант. электрон. 2012. **42**, 420-426.
2. Сироткин А.А., Власов В.И., Загуменный А.И. и др., Квант. электрон. 2014. **44**, 7-12.

Секция 2
КВАНТОВАЯ МАКРОФИЗИКА
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД.

**Анизотропия намагниченности в антиферромагнетиках
с тяжелыми фермионами $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{V}_6$**

А.Н. Азаревич, А.В. Богач, Н.Е. Случанко

*ИОФ РАН, отдел низких температур и криогенной техники,
лаборатория криогенной техники*

E-mail: azarevich@lt.gpi.ru

В последнее десятилетие исследование спонтанно возникающей пространственной анизотропии в трансляционно-инвариантной металлической фазе (т.н. электронного нематического эффекта (ЭНЭ)) выявило целый ряд вопросов, обращенных как к экспериментаторам, так и к теоретикам [1-4]. Было показано, что многочисленные экспериментальные объекты, такие как ультрачистые системы с квантовым эффектом Холла, рутенаты, высокотемпературные сверхпроводники [1] и сверхпроводники на основе железа [2-4] демонстрируют неожиданную анизотропию электронных свойств, которая исходно противоречит высокой симметрии исследуемых систем. Хотя представляется удивительным, как точечные электроны могут вести себя аналогично жидким кристаллам, в которых вытянутые молекулы являются естественными блоками при образовании нематической фазы [5], было предложено несколько теоретических механизмов для объяснения ЭНЭ [1,2,4]. Наиболее популярные из предложенных подходов используют неустойчивость Померанчука Ферми-жидкости, или плавление структуры страйпов [1]. Другой возможностью реализации электронной нематической фазы является система с орбитальным упорядочением, поскольку как орбитально упорядоченное состояние, так и электронные нематические фазы могут рассматриваться, как системы с нарушенной пространственной симметрией [1,4].

Выполненные недавно детальные исследования электронного спинового резонанса (ЭПР) [6] и угловых зависимостей магнетосопротивления в антиферроквадрупольной (АФК) фазе CeV_6 [7] позволили обнаружить ЭНЭ в этой системе с тяжелыми фермионами в магнитном поле, превышающем 0.3-0.5 Тл.

С целью изучения природы ЭНЭ в АФК фазе CeV_6 в работе выполнены прецизионные измерения намагниченности монокристаллических образцов твердых растворов $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{V}_6$ в парамагнитном и магнитоупорядоченном состоянии (рис.1).

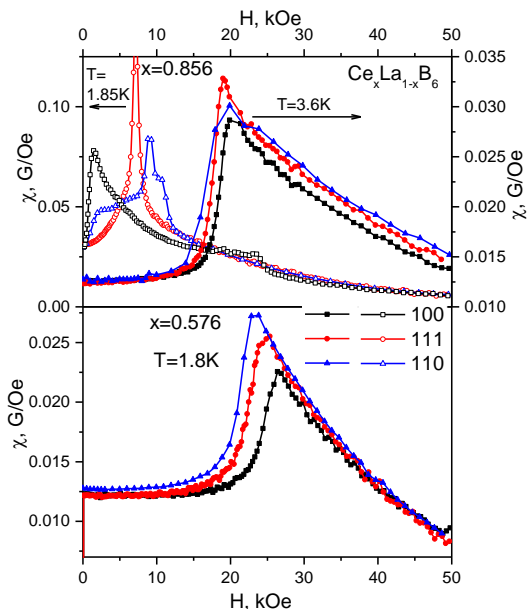


Рис. 1. Примеры температурных зависимостей восприимчивости гексаборидов $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{V}_6$ в окрестности магнитных фазовых переходов.

Показано, что как анизотропия намагниченности и фазовых границ АФК фазы, так и ЭНЭ, могут быть объяснены в рамках подхода, учитывающего кооперативный динамический эффект Яна-Теллера в борной подрешетке, который приводит к структурной и электронной (зарядовые страйпы) неустойчивости в этой сильно коррелированной электронной системе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-12-01426).

1. *E. Fradkin et. al.*, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, 2010, **1**, 153.
2. *J. Chu et. al.*, *Science*, 2010, **329**, 824.
3. *M.A. Tanatar et. al.*, *Phys. Rev.B*, 2010, **81**, 184508.
4. *R.M. Fernandes et al.*, *Nature Physics*, 2014, **10**, 97.
5. *L.M. Blinov*, *Structure and properties of liquid crystals*, Springer Dordrecht, Heidelberg, London, New York, **2011**.
6. *A.V. Semeno et. al.*, *Scientific Reports*, 2016, **6**, 39196.
7. *S.V. Demishev et. al.*, *Scientific Reports*, 2017, **7**, 17430.

Анизотропия рассеяния носителей заряда в антиферромагнетике $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$

К.М. Красиков, А.Л. Хорошилов, Н.Е. Случанко
ИОФ РАН, отдел низких температур и криогенной техники
E-mail: krasikokirill@yandex.ru

Появление антиферромагнитной фазы в магнитных додекаборидах $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{V}_{12}$ обычно связывают с РККИ-обменным взаимодействием (косвенный обмен) между ионами Ho через электроны проводимости. При этом так как додекабориды обладают кубической кристаллической симметрией, ожидается, что фазовые H-φ диаграммы должны быть практически изотропны. Однако вплоть до настоящего времени оставался открытым вопрос о том, как влияет на магнитные фазовые диаграммы динамический кооперативный эффект Яна-Теллера, и связанное с этим появление динамических проводящих каналов, обнаруженных в [1] в кристаллах LuV_{12} вдоль одного из направлений [110].

С целью выяснения природы этих взаимодействий в работе в интервале температур $T = (2.1 \div 6.5)$ К в магнитном поле до 80 кЭ методом вращения образца в магнитном поле были выполнены измерения удельного и холловского сопротивления монокристаллических образцов $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$ высокого качества.

Из полученных данных было найдено поведение магнетосопротивления $\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho(H) - \rho(H=0)}{\rho(H=0)}$ в координатах H-φ для трех температур 2.1 К, 4.2 К и 6.5 К (рис. 1). В парамагнитной фазе при температурах $T > 5.7$ К (рис. 1а) присутствует только отрицательное магнетосопротивление, в то время как в антиферромагнитном состоянии (рис. 1б и 1в) наблюдается сложный набор фаз, который характеризует большое положительное магнетосопротивление со значительной анизотропией и максимальным эффектом, достигающим 92% в поле 80 кЭ вдоль направления [001].

При $T=2.1$ К особенно значительна разница в ширине пиков магнетосопротивления для $H \parallel [110]$ и $H \parallel [001]$, первое из которых отвечает направлению зарядовых страйпов, а второе ориентировано перпендикулярно филаментарным каналам. Такая анизотропия, по-видимому, обусловлена перенормировкой магнитных взаимодействий в системе с динамическими зарядовыми страйпами. С увеличением температуры амплитуда и ширина пиков ($\Delta\rho/\rho$) уменьшается, однако и в парамагнитной фазе в анизотропном магнетосопротивлении доминирует эффект от динамических зарядовых страйпов, что согласуется с данными, полученными в [1].

1. *Sluchanko N., Bogach A., Bolotina N. et al. Phys. Rev. B. 2018, 97, 035150.*

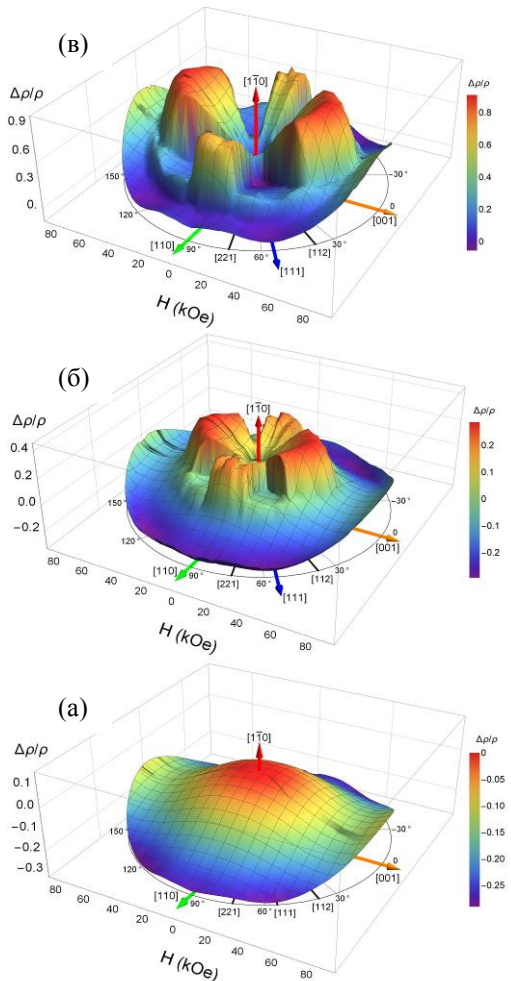


Рис. 1. Магнитные фазовые H-φ диаграммы $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{B}_{12}$ для 6.5 К(а), 4.2 К(б) и 2.1 К(в).

**Квантово-химическое моделирование
спектров комбинационного рассеяния света
стабильных конформаций
гексана (C₆H₁₄) и октадекана (C₁₈H₃₈)
в программе “Природа 6”**

С.М. Кузнецов

ИОФ РАН,

*отдел взаимодействия когерентного излучения с веществом,
лаборатория гиперкомбинационных рассеяний*

E-mail: kuznetsov.sm.93@gmail.com

Нормальные алканы (*n*-алканы, C_{*n*}H_{2*n*+2}) находят широчайшее применение в различных областях жизнедеятельности человека, в частности, в фармацевтике, косметологии, топливной промышленности. Кроме того, они являются модельными объектами при изучении структуры других веществ, содержащих углеводородные цепи (CH₂-цепи), таких как алкиламмониевые соли, жирные кислоты, спирты, липиды и т.д.

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света даёт ценную информацию при анализе структуры и качества таких органических соединений. Однако расшифровка их спектров оказывается далеко не тривиальной задачей, поскольку частоты и количество КР-активных колебаний определяются химическим и фазовым составами вещества, а также длиной и конформационной упорядоченностью CH₂-цепей [1]. В настоящее время спектральные диапазоны, в которых должны наблюдаться линии КР, отвечающие колебаниям определённых химических групп и связей, известны. Однако спектры КР большинства органических соединений с точки зрения конформационного состава остаются малоисследованными. В частности, даже для таких изученных соединений, как *n*-алканы, остается открытым ряд вопросов о связи линий КР и конформационного состава.

Цель данной работы – “*ab initio*” моделирование спектров КР стабильных конформеров *n*-алканов на примере гексана C₆H₁₄ и

октадекана $C_{18}H_{38}$ и интерпретация экспериментальных спектров этих соединений с точки зрения конформационного состава.

Для этого проводились квантово-химические расчёты с использованием программы «Природа 6», созданной на Химическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова [2]. Эта программа включает большинство широко используемых квантово-химических методов, в том числе, основанных на методе функционала плотности, и позволяет на персональном компьютере проводить оптимизацию геометрии молекул, рассчитывать ИК и КР спектры, а также решать другие задачи, используя сравнительно небольшие ресурсы.

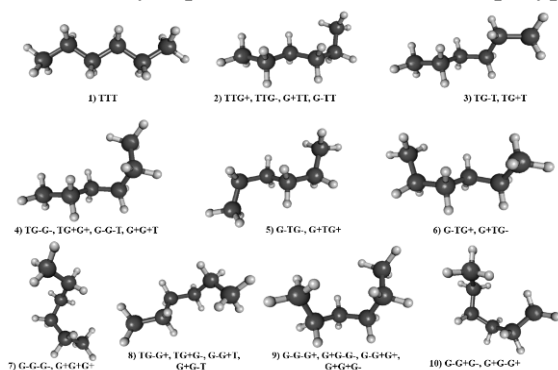


Рис. 1. Оптимизированные структуры конформеров гексана C_6H_{14} . Т – *trans*-конформер (четыре атома С, образующие плоский зигзаг), G+ – *gauche*-конформер (неплоский зигзаг) с поворотом С-С связи по часовой стрелке относительно оси молекулы, G- – *gauche*-конформер с поворотом против часовой стрелки.

На первом этапе моделирования необходимо было выбрать комбинацию функционала и базиса, которая обеспечивает наилучшее совпадение расчётных и экспериментальных данных. Рассматривались 6 встроенных функционалов (включая гибридные) и 2 базисных набора функций гауссова типа с различной размерностью. Для полностью *trans*-конформаций гексана и октадекана была проведена оптимизация геометрических параметров (углов и длин связей между атомами) и рассчитаны параметры спектров КР (частоты, интенсивности и деполяризационные

отношения линий). В результате сравнения с экспериментальными данными была выбрана комбинация гибридного функционала OLYP и базиса 4z, с помощью которой велись все дальнейшие расчёты. Отклонение расчётных частот от экспериментальных составило, в среднем, 5 см^{-1} .

На втором этапе работы были изучены возможные конформеры гексана. Всего различных конформеров у этой молекулы 27, но некоторые из них являются зеркальными изомерами. Поэтому их можно разделить на 10 групп, представленных на рисунке 1. Сравнение расчётных и экспериментальных спектров показало, в частности, что спектр гексана содержит линии ($826, 871, 1041$ и 1083 см^{-1}), в которые не дают вклад *TTT*-конформеры (рис. 1).

На последнем этапе работы по распределению Больцмана было вычислено относительное содержание каждой группы конформеров. Показано, что основной вклад (52%) в спектр КР дают *TTT*-конформеры и следующие группы: группа 2 (28%), 3 (13%) и 4 (4%). Вклады остальных конформеров оказались пренебрежимо малыми. Рассчитанное из экспериментального спектра содержание *TTT*-конформеров составило 55%.

Таким образом, выполненные в настоящей работе квантово-химические расчёты позволили адекватно описать конформационный состав и экспериментальные спектры КР *n*-алканов, что позволяет в дальнейшем использовать этот подход для анализа более сложных органических соединений.

Работа подготовлена при поддержке программы Президиума РАН №7 «Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов».

1. *Shemouratov Yu.V., Prokhorov K.A., Nikolaeva G.Yu. et al.* Laser Physics. 2008, **18**(5), 554-567.

2. *Laikov D.N.* Chemical Physics Letters. 1997, **281**(1-3), 151-156.

Исследование конформационной изомерии пентана: квантово-химическое моделирование спектров КР

В.С. Новиков

ИОФ РАН,

*отдел взаимодействия когерентного излучения с веществом,
лаборатория гиперкомбинационных рассеяний*

E-mail: vasiliy1992@gmail.com

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света является высокоинформативным и неразрушающим методом молекулярной спектроскопии. Этот метод позволяет определить строение, конформационный состав молекул и другие важные структурные характеристики вещества [1].

Целью данной работы было квантово-химическое моделирование спектра КР пентана. Пентан является одним из углеводородных соединений, имеющих большое практическое значение и применяющихся, в том числе, в нефтехимии и фармацевтике. С другой стороны, результаты моделирования структуры и спектров КР пентана важны для расчетов более сложных соединений, таких как, например, алкиламмониевые соли и хлоралканы, которые планируется исследовать в дальнейшем.

Квантово-химические методы расчёта уже давно зарекомендовали себя как надёжный способ определения структуры и спектральных характеристик молекул. Существует большое количество программ для решения подобных задач. Квантово-химические расчёты в этой работе были проведены при помощи программы «Природа б», разработанной на химическом факультете МГУ [2]. Она обладает рядом преимуществ перед аналогичными с точки зрения минимизации времени расчёта и вычислительных ресурсов. В настоящей работе использовался метод функционала плотности, который позволяет получать хорошее совпадение с данными эксперимента.

Первым шагом в работе был выбор функционала и базисных наборов, которые дают наилучшее совпадение структурных

параметров пентана (длин связей и валентных углов), а также параметров спектра КР (положения пиков, интенсивностей и деполяризационных отношений) с экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов [3]. По результатам расчёта была выбрана оптимальная комбинация – расширенные базисы гауссова типа (4z.bas) и гибридный функционал OLYP [4].

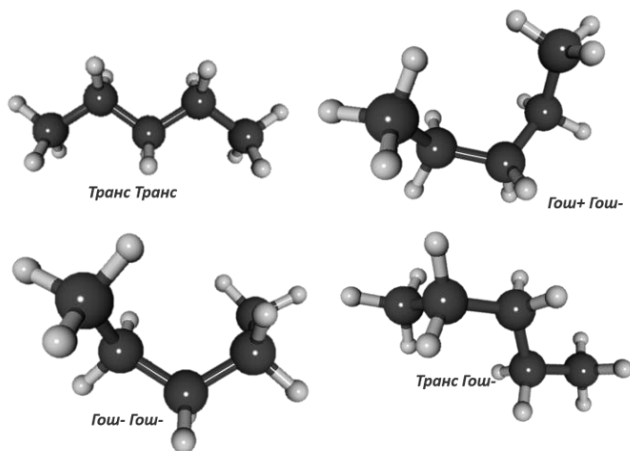


Рис. 1. Оптимизированные структуры конформеров пентана. Обозначения: *Гош+* – торсионный угол положительный, *гош-* – торсионный угол отрицательный.

Данная комбинация была использована на втором этапе для оптимизации геометрических параметров и расчета спектров КР известных из литературы девяти стабильных конформеров пентана. На рисунке 1 показаны четыре из девяти таких конформеров. Моделирование показало, что остальные пять стабильных конформеров из-за зеркально симметричной структуры имеют энергию и колебательный спектр, полностью идентичные с конформерами, приведенными на рис. 1.

Итоговый расчетный спектр КР пентана был получен суммированием спектров стабильных конформеров молекул с весовыми коэффициентами, оцененными при использовании распределения Больцмана. Для комнатной температуры (то есть, для

жидкого состояния) и с учетом степени вырождения каждой конформации по энергии получено, что в полностью *транс* конформации содержится более 63% молекул, в *транс-гош* конформации - около 34%, а в *гош-гош*- и *гош+гош*- конформациях, соответственно, 2.5% и 0.2%.

Далее было проведено сравнение с экспериментальным спектром КР пентана. По результатам сравнения оказалось, что расчёты дают очень хорошее согласие с экспериментальными данными. Среднее отклонение в положениях линий составляет не более, чем 5 см^{-1} , что считается очень хорошим совпадением при квантово-химических расчетах без применения процедуры масштабирования частот или силовых постоянных. Рассчитанные деполаризационные отношения линий КР полностью соответствуют симметрии колебаний.

Таким образом, в работе показано, что квантово-химическое моделирование с использованием программы Природа 6 позволяет описать спектр КР пентана и оценить его конформационный состав.

Работа подготовлена при поддержке программы Президиума РАН №7 "Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов".

1. Л.В. Левшин, А.М. Салецкий, «Оптические методы исследования молекулярных систем. Молекулярная спектроскопия», 320 с, 1994.
2. D.N. Laikov, Yu.A. Ustynyuk, Russian Chem. Bulletin, 2005, **54**(3), 820-826.
3. R.G. Snyder, J. Chem. Phys., 1967, **47**(4), 1316-1360.
4. J. Baker, P. Pulay, J. Chem. Phys., 2002, **117**,1441.

Применение теории Абрахамса-Вольфле к описанию ЭСР в гексабориде церия

А.Н. Самарин, М.И. Гильманов, А.В. Семено, С.В. Демишев
ИОФ РАН, Отдел низких температур и криогенной техники
E-mail: sasha@lt.gpi.ru

В недавней работе [1] были представлены результаты анализа электронного спинового резонанса (ЭСР) в Кондо-решетке CeB_6 . Одной из интересных особенностей является аномальная температурная зависимость осциллирующей намагниченности от температуры $M_0(T)$, которая может быть найдена в рамках модели локализованных магнитных моментов (ЛММ). Для направления [100] в диапазоне температур $T \sim 2.4\text{-}2.6$ К наблюдалось превышение осциллирующей намагниченности над статической ($M_0 > M$).

Теория ЭСР Абрахамса-Вольфле [2] была разработана специально для объяснения формы резонансной линии в Кондо-решетке YbRh_2Si_2 . Модель учитывает вклад в ЭСР от ЛММ и электронов проводимости [2]. Каждый вклад характеризуется свим g -фактором (g_f, g_c) и шириной резонансной линии (W_f, W_c). В данной модели динамическая магнитная восприимчивость

$$\chi \sim \mu_B^2 (g_f^2 \chi_{ff} + g_c^2 \chi_{cc} + 2g_c g_f \chi_{cf})$$

представляет собой сумму трех членов: ЛММ (χ_{ff}), электронов проводимости (χ_{cc}) и вклада, описывающего взаимодействие ЛММ и зонных электронов (χ_{cf}) [2].

В настоящей работе было показано, что теория Абрахамса-Вольфле [2] позволяет описать экспериментальные кривые резонансного поглощения, считая, что осциллирующая намагниченность совпадает со статической ($M_0 = M$), а g -факторы одинаковы ($g_f = g_c$). Было показано, что наша модель позволяет качественно и количественно описать ЭСР в гексабориде церия. На рисунке 1 приведена температурная зависимость расчетной ширины линии ЭСР от локализованных магнитных моментов $W_f(T)$, которая увеличивается с температурой. Был оценен вклад электронов

проводимости в линию поглощения: ширина линии ЭСР от зонных электронов $W_c(T)$ оценивается в 30-75 раз больше $W_f(T)$ (рис. 1) и наблюдается в эксперименте как широкая базовая линия. Показано, что при анализе в рамках модели ЛММ именно вклад зонных электронов приводит к аномальному отклонению осциллирующей намагниченности от статической, наблюдавшейся в [1].

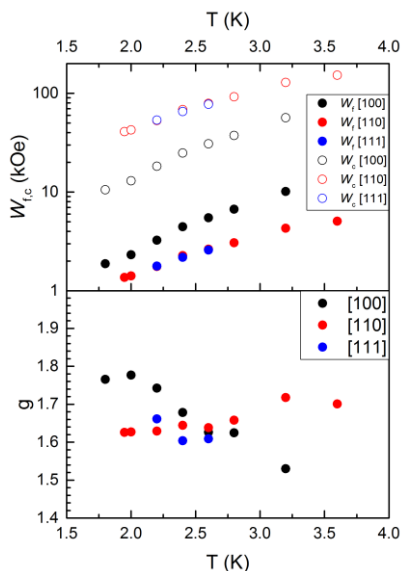


Рис. 1. Температурные зависимости ширины линии ЭСР для различных кристаллографических направлений. W_f – вклад от ЛММ, W_c – вклад от зонных электронов.

Работа выполнена при поддержке программы РАН «Электронный спиновый резонанс, спин-зависимые электронные эффекты и спиновые технологии» и Программы ОФН РАН «Электронные корреляции в системах с сильным взаимодействием».

1.A.V. Semeno *et al.*, Sci. Rep. 2016, **6**, 39196

2.Abrahams E. and Wölfle P.: Phys. Rev. B 2008, **78**, 104423

Исследования показали, что с точностью ~ 1 мкКл/м² спонтанная поляризация вдоль всех кристаллографических направлений (a , b , c) – отсутствует. При вращении образца в $H=13.4$ кЭ при $T=4.2$ К вокруг различных кристаллографических направлений, с точностью ~ 0.1 мкКл/м², были получены следующие результаты: (a) $P_c(H_i) \approx 0$ ($i=a,b,c$); (b) $P_i(H_c) \approx 0$ ($i=a,b,c$); (c) $P_a \approx 0$ для H в ab - и ac -плоскостях $P_a \sim \sin 2\theta$ для H в bc плоскости; (d) $P_b \approx 0$ для H в ab и bc - плоскостях, $P_b \sim \sin 2\theta$ для H в ac плоскости. Показано, что в приближении слабых полей индуцированная поляризация квадратично зависит от магнитного поля. В квадратичном приближении зависимость индуцированной поляризации в парамагнитном состоянии от поля может быть представлена в виде: $P_x = \alpha_1 H_x H_z + \alpha_2 (H_x^2 - H_y^2) + \dots$;

$P_y = -\alpha_1 H_x H_z - 2\alpha_2 H_x H_y + \dots$, где x, y, z соответствуют a, b и c осям кристалла (аналогично редкоземельным боратам [6]).

Были проведены измерения поляризации в зависимости от магнитного поля, в полях до 5 Т в диапазоне температур от 2 до 60 К и в полях до 8 Т при температурах от 9 до 60 К. Оказалось, что с увеличением поля квадратичная зависимость поляризации переходит в линейную. Соотношение $P(\theta) \approx -P(-\theta)$, где θ - угол между полем H и его проекцией на базисную плоскость, выполняется для следующих ориентаций: $P_b(H_{a\theta c})$, $P_a(H_{b\theta c})$ и $P_a(H_{a45b\theta c})$, причем для конфигурации $P_a(H_{a45b-c})$, в которой $H_x = H_y$ и вклад в поляризацию от $\alpha_2(H_x^2 - H_y^2)$ отсутствует, были получены более симметричные зависимости, чем для $P_a(H_{b\theta c})$. С увеличением температуры поляризация уменьшается и меняет знак в окрестности T_N . При исследовании поляризация в базисной плоскости $P_a(H_{a,b})$ и $P_b(H_{a,b})$ обнаружены её резкие изменения в полях выше $3 \div 5$ Т, которые вызваны небольшими неконтролируемыми отклонениями магнитного поля от базисной плоскости и могут быть связаны с изменением ориентации треугольной спиновой структуры (отклонением от базисной

плоскости). Показано, что знак индуцируемой поляризации зависит от знака проекции поля на ось c .

Исследования поляризации в импульсных полях до 60 Т выявили асимметрию полевых зависимостей P_b компоненты поляризации в магнитном поле, направленном под углами $\pm 45^\circ$ к оси c в плоскости ac , а также $P_a(H_{b\pm 10^\circ c})$ (рис. 1) и $P_a(H_{a45^\circ b\pm 10^\circ c})$. Обнаружено, что изначально антисимметричная относительно отклонения поля от ab -плоскости полевая зависимость поляризации меняет характер в достаточно сильных полях, что может быть связано с искажениями треугольной магнитной структуры и объяснено дополнительными вкладами (четвёртого порядка и выше) в поляризацию: $P_x^{(4)} \sim (H_x^2 - H_y^2)^2 - 4H_x^2 H_y^2$, $P_y^{(4)} \sim 4H_x H_y (H_x^2 - H_y^2)$.

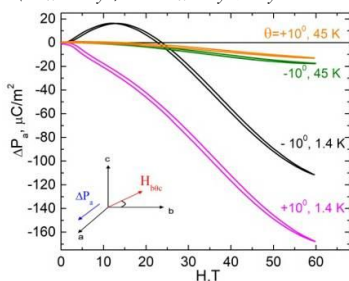


Рис. 1. Зависимость $P_a(H_{b\theta c})$ в BNFSO от поля, лежащего под углом θ к оси b , в плоскости bc .

Аналогичные температурные и полевые зависимости электрической поляризации были получены для монокристаллов $Ba_3TaFe_3Si_2O_{14}$ и $Sr_3TaFe_3Si_2O_{14}$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-12-10531).

1. *K. Marty, et al.*, Phys. Rev. Lett. 2008, **101** 247201; Phys. Rev. B. 2010, **81**, 054416.
2. *H.D. Zhou, et al.*, Chem. Mater. 2009, **21**, 156-159.
3. *N. Lee, J. Choi, S.-W. Cheong*, Appl. Phys. Lett. 2014, **104**, 072904.
4. *H. Narita, et al.*, Phys. Rev. B. 2016, **94**, 094433.
5. *A.M. Balbashov, S.K. Egorov*, J. Cryst. Growth 1981, **52**, 498-504.
6. *A.K. Звездин и др.*, Письма ЖЭТФ. 2005, **81**, 335.

**Скейлинг и анизотропия
магнетосопротивления в парамагнитном состоянии
антиферромагнетика $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$**

*А.Л. Хорошилов, В.Н. Краснорусский, Н.Е. Случанко
НОЦ ИОФ РАН, отдел низких температур и криогенной техники,
кафедра лазерных систем и структурированных материалов
E-mail: poligon-51@yandex.ru*

В редкоземельных додекаборидах RB_{12} с относительно простой ГЦК структурой при температурах ниже $T^* \sim 60$ К наблюдается [1] переход в состояние каркасного стекла, характеризующегося случайными смещениями ионов R^{3+} относительно centrosymmetricных положений внутри кубооктаэдров B_{24} в борной подрешетке. Более того, типичный пример немагнитного соединения со структурой каркасного стекла LuB_{12} демонстрирует понижение кубической симметрии при падении температуры с 300 до 50 К [2]. При этом, исследования магниторезистивных свойств LuB_{12} выявили [4] сильную анизотропию магнетосопротивления (МС), зависящую от направления измерительного тока через образец и направления внешнего магнитного поля. Авторы связывают данное явление в RB_{12} с формированием проводящих каналов - динамических зарядовых страйпов в ГЦК решетке додекаборида. С другой стороны, результаты последних рентгеноструктурных исследований [3] обнаруживают сложную анизотропную магнитную структуру антиферромагнитного (АФ) состояния HoB_{12} и ближний АФ порядок в парамагнитной фазе (ПМ) при температурах $T_N < T < 3T_N$ (T_N – температура Нееля).

В связи с этим, учитывая общий характер возникновения электронной неустойчивости в RB_{12} , представляет интерес изучение характеристик зарядового транспорта в ПМ фазе концентрированного твердого раствора замещения $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{B}_{12}$ в зависимости от направления магнитного поля с целью выяснения ключевых особенностей рассеяния носителей заряда в данных соединениях.

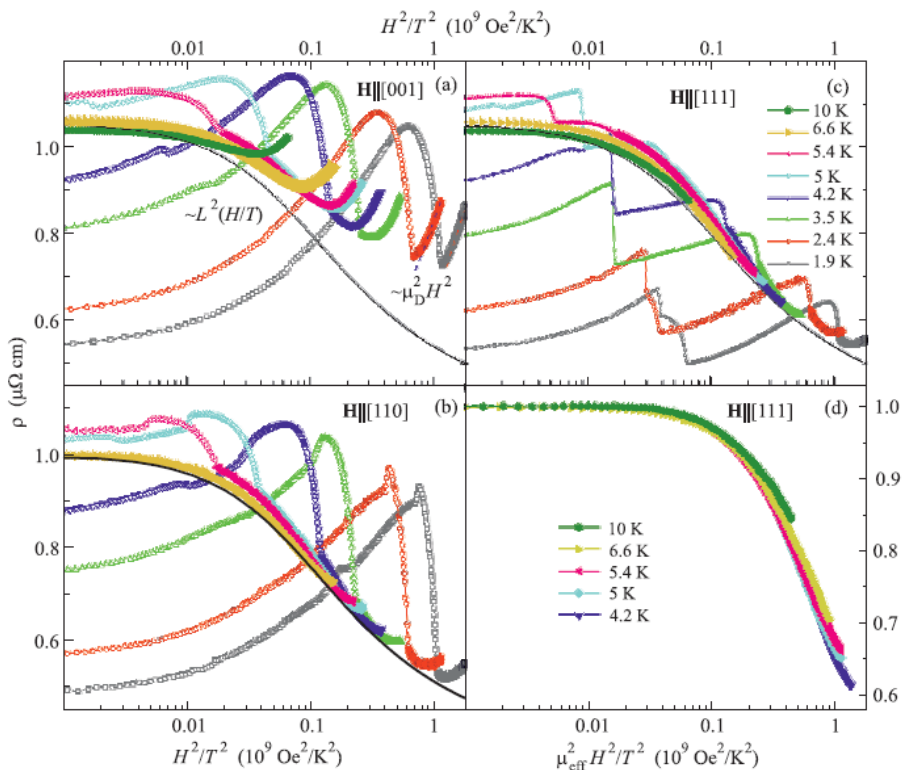


Рис. 1. Полевые зависимости удельного сопротивления $\text{No}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$ в координатах $\rho(H^2/T^2)$ для температур 2–10 К при различных ориентациях магнитного поля относительно трех главных кристаллографических направлений: (а) – $\mathbf{H} \parallel [001]$, (б) – $\mathbf{H} \parallel [110]$ и (с) – $\mathbf{H} \parallel [111]$.

В данной работе представлены результаты прецизионных измерений удельного сопротивления и поперечного магнетосопротивления на постоянном токе $\mathbf{I} \parallel [1-10]$ для монокристаллических образцов модельного соединения $\text{No}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$, выполненные в интервале температур 1.9–12 К для различных поперечных ориентаций внешнего магнитного поля ($\perp \mathbf{H}$) напряженностью до 80 кЭ методом пошагового вращения с фиксацией положения образца. Показано, что доминирующий для направлений $\mathbf{H} \parallel [110]$ и $\mathbf{H} \parallel [111]$ отрицательный вклад оказывается изотропным и масштабируется в координатах $\rho = f(\mu_{\text{eff}}^2 H^2/T^2)$, что

соответствует рассеянию носителей на АF-кластерах ионов Ho^{3+} (области ближнего АF-порядка) в парамагнитной фазе додекаборида. Обнаружено, что анизотропия магнетосопротивления связана с положительным вкладом, который принимает максимальные значения вдоль $\mathbf{H} \parallel [001]$ и может быть обусловлен рассеянием носителей заряда на филаментарной структуре (динамические зарядовые страйпы), найденной ранее в LuB_{12} .

1. *Sluchanko N.E., Azarevich A.N., Bogach A.V. et al.* JETP, 2011, **113**, 468.
2. *N. Bolotina, I. Verin, N. Shitsevalova et al.* Crystallogr. Rep., 2016, **61**, 181-186.
3. *K. Siemensmeyer, K. Habicht, Th. Lonkai et al.* JLTP, 2007, **146**, 5/6.
4. *Sluchanko N., Bogach A., Bolotina N. et al.* Phys. Rev. B 2018, **97**, 035150.
- 1.5. *N. Sluchanko, A. Khoroshilov, M. Anisimov et al.* Phys. Rev. B, 2015, **91**, 235104.

**Исследование
методами широкополосной терагерцовой
и инфракрасной спектроскопии
функции диэлектрического отклика
перспективных нелинейно-оптических кристаллов**

С.В. Чучупал¹, А.А. Васин¹, А.А. Кузнецов²

*¹ИОФ РАН, отдел субмиллиметровой спектроскопии,
лаборатория субмиллиметровой диэлектрической спектроскопии*

²МГТУ им. Н.Э. Баумана

E-mail: MirrorMan@yandex.ru

Терагерцовый (ТГц) диапазон частот (10^{11} – 10^{13} Гц) является областью дисперсии, в которой проявляется ряд физических явлений, представляющих фундаментальный интерес в различных областях физики и химии и имеющих неоспоримое практическое значение. ТГц-излучение применяется для неразрушающего контроля качества выпускаемой продукции, в газоанализе, медицинской диагностике, для дистанционной идентификации предметов и пр. Всё это является стимулом к непрекращающемуся поиску и исследованиям новых материалов для активных и пассивных элементов ТГц-техники.

Существующие экспериментальные методы перекрывают широчайший частотный диапазон, охватывающий не менее пятнадцати декад. Различие методик радиотехнических (мостовых, импедансных) и квазиоптических спектроскопических определило и различие в подходах анализа широкополосной функции диэлектрического отклика вещества. Главное преимущество заключается в том, что для них едины правила отбора, позволяющие рассматривать весь комплекс экспериментальных данных в рамках единого аналитического подхода. При этом открываются возможности количественного анализа взаимного влияния различных механизмов, формирующих электро- и магнитодипольный отклик твёрдых тел. К ним относятся релаксационные и колебательные полосы поглощения, ферро- и

антиферромагнитные резонансы, электромагноны [1] и, в некоторых случаях, электронные переходы [2].

Тройные нелинейно-оптические кристаллы со структурой халькопирита, такие как $ZnGeP_2$ и $CdSiP_2$, с одной стороны, обладают большим потенциалом для эффективного нелинейно-оптического преобразования лазерного излучения в ТГц-области [3–7] и, с другой стороны, представляют фундаментальный интерес для изучения функции широкодиапазонного диэлектрического отклика. Работа направлена на исследование особенностей электродинамических характеристик широкого класса диэлектриков и широкозонных полупроводников с целью определения эффективности их применения в качестве активных и пассивных элементов ТГц-техники.

Применение трёх взаимодополняющих экспериментальных методов – ИК-Фурье-спектроскопии, субмиллиметровой (СБММ) ЛОВ- и TDS-спектроскопии – позволило не только расширить частотный диапазон, но, что гораздо важнее, увеличить динамический диапазон регистрируемого поглощения. Объединение экспериментальных данных различных физических величин, наиболее достоверно определяемых в каждом частотном интервале, дало возможность проанализировать механизмы поглощения, различающиеся на 5–7 порядков в величинах мнимой части диэлектрической проницаемости. Типичный пример такого спектра показан на рисунке 1, где крупные точки 1 – данные ТГц- и ЛОВ-измерений, а сплошная линии 2 и 3 – расчёт однофононного спектра с учётом дополнительных механизмов поглощения и без их учёта соответственно.

Этот подход применён при исследовании механизмов дипольного поглощения, формируемых как типичным для ионных кристаллов однофононным поглощением, так и многочастичными процессами и несобственным поглощением. Изучение температурной эволюции отклика даёт возможность разделения

механизмов, вносящих существенный вклад в потери ТГц-излучения в различных материалах [8].

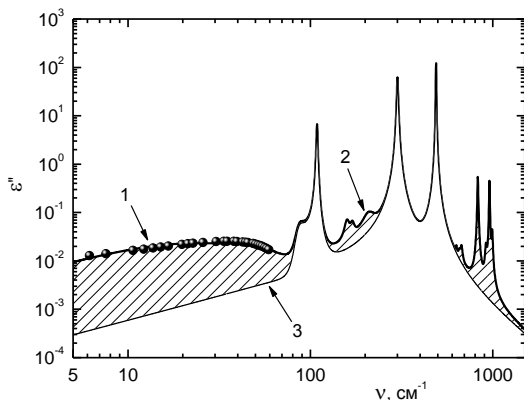


Рис. 1. Спектр мнимой части диэлектрической проницаемости $\varepsilon''(\nu)$ монокристалла CdSiP_2 в поляризации $\mathbf{E} \parallel \mathbf{c}$, где точки 1 – калибровочные данные СБММ-измерения, линия 2 – модельные данные с учётом всех механизмов поглощения, линия 3 – фоновый вклад, штриховка – вклад дополнительных механизмов поглощения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-32-00322).

1. Pimenov A., Mukhin A.A., Ivanov V.Yu. et al. *Nature Phys.* 2006, **2**, 97–100.
2. Komandin G.A., Zhukova E.S., Torgashev V.I. et al. *J. Appl. Phys.* 2013, **114**, 024102.
3. Воеводин В.Г., Чалдышев В.А. *Вестник ТГУ* 2005, **285**, 63–73.
4. Аполлонов В.В., Грибенюков А.И., Короткова В.В. и др. *Квантовая электроника* 1996, **23**, 483–484.
5. Rowley J.D., Pierce J.K., Brant A.T. et al. *Opt. Lett.* 2012, **37**, 788–790.
6. Itoh N., Fujinaga T., Nakau T. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1987, **17**, 951–952.
7. Petrov V., Noack F., Tunchev I. et al. *Proc. SPIE* 2009, **7197**, 71970.
8. Чучупал С.В., Командин Г.А., Жукова Е.С. и др. *ФТТ* 2015, **57**, 1467–1472.

Секция 3
ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ:
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОСТРУКТУРЫ

**Оптическое поглощение и люминесцентные свойства
эпитаксиальных пленок $(\text{Pb,Gd})_3\text{Al}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ при $0 < x < 3.1$,
активированных ионами церия**

Д.А. Васильев¹, В.Г. Плотниченко²

¹НОЦ ИОФ РАН

²НЦВО РАН

E-mail: dimaphys@gmail.com

Гранаты, активированные редкоземельными ионами, кроме лазерных сред [1], образуют важный класс материалов, которые нашли свое применение в качестве детекторов рентгеновского и гамма-излучения, люминесцентных конверторов излучения светодиодов [2]. Среди кристаллов гранатов наиболее перспективным считается монокристалл $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (1 ат.%), теоретический световой выход сцинтилляций которого составляет $74\,000 \pm 7400$ фотонов/МэВ. В настоящее время 2-х дюймовый монокристалл $\text{Gd}_3\text{Al}_{2.3}\text{Ga}_{2.7}\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (1 ат.%), выращенный методом Чохральского, продемонстрировал величину световыхода около 58 000 фотонов/МэВ. Сцинтилляционное время затухания люминесценции быстрой компоненты в этом кристалле составляет 172 нс (88% доли выхода излучения) и длина волны излучения 516 нм. Наряду с объемными монокристаллами находят свое применение монокристаллические пленки в качестве сцинтилляционных экранов. В литературе отсутствует информация о синтезе и исследовании свойств пленок $(\text{Pb,Gd})_3\text{Al}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}:\text{Ce}$ при $0 < x < 3.1$, выращенных методом ЖФЭ из переохлажденных растворов-расплавов $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$. В связи с этим для практического применения пленок $(\text{Pb,Gd})_3\text{Al}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}:\text{Ce}$ в качестве сцинтилляционных экранов представляется актуальным дальнейшее изучение их оптических и люминесцентных свойств при $0 < x < 3.1$.

Поэтому в качестве объектов исследования в данной работе были выбраны образцы эпитаксиальных гранатовых пленок $(\text{Pb,Gd})_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$, выращенных методом ЖФЭ из переохлажденных растворов-расплавов $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ с диапазоном концентраций в шихте оксидов церия от 0.03 до 0.3 мол. % и алюминия от 2.1 до 5 мол. %

Целью работы являлось исследование оптического поглощения, фотолюминесценции, кинетики затухания и световыхода катодоллюминесценции эпитаксиальных плёнок $(\text{Pb,Gd})_3\text{Al}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}:\text{Ce}$ при $0 < x < 3.1$, выращенных методом ЖФЭ, для получения образцов, которые обладают максимальной интенсивностью фотолюминесценции и максимальным значением световыхода люминесценции.

Основным результатом диссертационной работы является синтез эпитаксиальных пленок $(\text{Pb,Gd})_3\text{Al}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}:\text{Ce}$ при $0 < x < 3.1$ и результаты исследования их оптических и люминесцентных свойств. Основными методами исследования являлись спектроскопия оптического пропускания света и люминесцентная спектроскопия при возбуждении излучением УФ- и ВУФ- диапазонов, а также электронами с энергией $80 < E_e < 120$ кэВ и длительностью одиночного импульса 300 пс. При проведении исследований получены следующие основные результаты:

1. Результаты комплекса исследований положения поверхности ликвидуса и режимов синтеза эпитаксиальных пленок $(\text{Pb,Gd})_3\text{Al}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}:\text{Ce}$ при $0 < x < 3.1$, выращенных из переохлажденных растворов-расплавов $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ при концентрациях в шихте оксидов гадолиния от 0.2 до 0.5 мол. %, церия от 0.03 до 0.3 мол. % и алюминия от 2.1 до 5 мол. %.

2. Показано, что вхождение ионов алюминия в структуру $(\text{Pb,Gd})_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ приводит к изменению положения максимумов полос поглощения ионов Ce^{3+} и Pb^{2+} , возникновению фотолюминесценции. Образование центров Ce^{4+} в структуре

$(\text{Pb,Gd})_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ приводит к уменьшению интенсивности полосы поглощения уровня $5d_2$ и увеличению поглощения в области до 360 нм, а также к уменьшению интенсивности фотолюминесценции, времени затухания и световыхода катодолюминесценции ионов Ce^{3+} .

3. Установлено, что эпитаксиальная пленка $\text{Pb}_{0.01}\text{Ce}_{0.03}\text{Gd}_{2.96}\text{Al}_{3.14}\text{Ga}_{1.86}\text{O}_{12}$, выращенная из переохлажденного раствора-расплава $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ при концентрациях в шихте оксидов гадолиния 0.4 мол. %, алюминия 4.5 мол.% и церия 0.2 мол.% имеет максимальную интенсивность фотолюминесценции ионов Ce^{3+} на длине волны излучения 532 нм при возбуждении на 165 нм и максимальный световыход катодолюминесценции около 51 500 фотонов/МэВ при времени затухания медленной компоненты 61.0 нс (68%).

4. Показано, что время затухания люминесценции пленки $\text{Pb}_{0.02}\text{Ce}_{0.05}\text{Gd}_{2.93}\text{Al}_{4.29}\text{Ga}_{0.71}\text{O}_{12}$, выращенной из раствора-расплава $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ при концентрациях в шихте оксидов гадолиния 0.4 мол.%, алюминия 4.5 мол.% и церия 0.3 мол.%, составляет 22 нс (20%) для быстрой компоненты и 67 нс (80%) для медленной компоненты и пленки этого состава можно использовать в качестве люминофора в конструкции электронно-оптического преобразователя типа ПИФ-01.

5. В методе подавления спонтанного сцинтилляционного излучения рентгеновского изображения сцинтилляционная пленка $\text{Pb}_{0.01}\text{Gd}_{2.96}\text{Ce}_{0.03}\text{Al}_{3.14}\text{Ga}_{1.86}\text{O}_{12}$ показала уменьшение интенсивности люминесценции на 64% при возбуждении лазерами на 405 нм и на 628 нм (STED-лазер) при увеличении мощности последнего от 0 до 104 мВт, при этом подавление люминесценции происходило при мощности лазера ($P_s \approx 45$ мВт).

1. *Осико В.В, Щербаков И.А.* Фотоника. 2013, **39**(3),14-33.
2. *Kamada K., Shoji Y., Kochurikhin V.V. et al.* J. Cryst. Growth. 2016, **452**, 81-84.

Распределение люминесценции в объеме кристалла ZnSe:Fe

А.А. Гладилин, В.П. Калинушкин, О.В. Уваров

ИОФ РАН, ОИКТ,

лаборатория кристаллических лазеров среднего ИК-диапазона

E-mail: agladilin@kapella.gpi.ru

В настоящее время продолжают исследования по поиску активных сред для среднего инфракрасного диапазона. Данный диапазон важен для научных исследований, промышленных и других применений. Кристаллы селенида цинка, легированные железом, являются перспективным материалом для создания ИК-лазеров среднего диапазона. На данных кристаллах получены уникальные генерационные характеристики при оптическом возбуждении НФ лазером (2.7-3.1 мкм) близкие к теоретическому максимуму. На сегодняшний день реализован частотный режим при комнатной температуре с мощностью импульса 50 мДж и частотой 100 кГц; эффективность составила 50 % при теоретическом максимуме 64 %.

Однако, создание на такой базе малогабаритной и высокоэффективной лазерной системы маловероятно. Поэтому была поставлена задача создания лазера на основе ZnSe: Fe с накачкой «горячими» электронами: либо потоком внешних электронов, либо ускоренными электрическим полем электронами в зоне проводимости. Решение этой задачи требует детального исследования электрофизических и структурных характеристик используемых кристаллов.

В качестве образцов использовались кристаллы ZnSe, легированные Fe с поверхности. То есть на кристалл ZnSe наносилась пленка Fe, и проводился процесс термодиффузии при температурах 850-1100°C. При этом концентрация допанта на поверхности легирования достигает $5 \cdot 10^{19}$ ат/см³. Легирующая примесь экспоненциально спадает в объеме кристалла и ведет к образованию большого количества разнообразных дефектов.

Для исследования кристаллов применялось два основных метода: двухфотонная конфокальная микроскопия (ДФКМ) и низкотемпературная фотолюминесценция (НТФЛ).

ДФКМ позволяет строить послойно плоские карты распределения люминесценции с шагом 10 мкм до 3 мм в глубину.

Карты регистрируются в диапазоне 425-725 нм со спектральным разрешением 3 или 10 нм.

При исследовании с помощью ДФКМ проводились два типа эксперимента:

1) «Колодец»: карта люминесценции строилась перпендикулярно вектору диффузии. То есть на карте отображалась область с одной концентрацией вводимой примеси.

2) «Поперечное сечение»: карта строилась параллельно вектору диффузии, таким образом регистрировалась вся область спада концентрации легирующей примеси.

Преимуществом данного метода заключается в том, что возбуждающее излучение лазера (800 нм) проходит в глубь образца, а двухфотонный процесс обеспечивает энергетику для преодоления электроном запрещенной зоны кристалла [1].

При НТФЛ производилась регистрация люминесценции «на отражение». Излучение возбуждающего лазера 405 нм поглощалось в тонком приповерхностном слое образца. Люминесценция детектировалась в диапазоне 0,4-1,1 мкм. Эксперименты проводились при температуре 5 К.

В ходе работы были изучены плоские карты распределения люминесценции в диапазоне 0,4-1,1 мкм. Было обнаружено, что в образцах образуются широкие области, размером до 100 мкм. Данные области имеют максимумы люминесценции на определенной длине волны и визуализируются в виде светлой полосы. Светлые полосы располагаются в области не минимальной концентрации вводимой примеси. При этом максимумы люминесценции для каждой длины волны находятся на разных расстояниях от поверхности легирования. Данные результат носит общий характер и для монокристалла и для поликристалла ZnSe:Fe, отличаясь размерами и положением светлых полос. Наблюдения подтверждают обе методики исследования.

Предполагается, что полученное распределение люминесценции в диапазоне 0,4-1,1 мкм связано с образованием множества собственных дефектов в процессе легирования Fe кристаллов ZnSe. Данные дефекты, по всей видимости, обладают разной скоростью диффузии в глубь кристалла, что обеспечивает разную концентрацию дефектов на разном расстоянии от поверхности легирования.

Работа подготовлена базе центра коллективного пользования (ЦКП) ИОФ РАН при поддержке программы президиума РАН «Фундаментальные основы прорывных технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности» (проект «Исследование возможности создания высокоэффективных лазеров ИК-диапазона (4÷5 мкм) на основе кристаллов ZnSe, легированных железом, при ударном возбуждении ионов активатора горячими электронами»).

1. *Калинушкин А.А., Уваров О.В.* Письма в ЖЭТФ. 2016, **104**, 774-779.

**Анти-резонансные и фотонно-кристаллические
ТГц волноводы
на основе профилированных кристаллов сапфира**

Г.М. Катыба^{1,2,3*}, Н.В. Черномырдин^{1,3}

Г.А. Командин¹, В.Н. Курлов² и К.И. Зайцев^{1,3}

*¹ИОФ РАН, отдел субмиллиметровой спектроскопии, лаборатория
субмиллиметровой спектроскопии*

²Институт физики твёрдого тела РАН

*³Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана*

**E-mail: katyba_gm@issp.ac.ru*

Терагерцовое (ТГц) излучение применяется для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных проблем [1]. В частности, методы ТГц спектроскопии и визуализации используются для неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов и керамик, обеспечения безопасности жизнедеятельности, медицинской диагностики злокачественных новообразований и др. Одним из важных направлений исследований в области ТГц техники является создание волноводов и волокон для доставки ТГц излучения к объекту диагностики или воздействия.

В настоящее время существует несколько подходов к созданию подобных устройств – полые металлические трубки и металлические трубки с диэлектрическим покрытием [2], плазмонные волноводы [3], гибкие микроструктурированные полимерные волноводы фотонно-кристаллического (ФК) или антирезонансного (ARROW – Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide) типов [4]. Существующие ТГц волноводы имеют значительные недостатки – высокую дисперсию и потери, высокую чувствительность к условиям измерений, низкую механическую прочность, термическую и химическую стойкость. Отмеченное значительно ограничивает область их применения.

В работах [5, 6] впервые предложено использовать микроструктурированные профилированные кристаллы сапфира в

качестве жестких ТГц волноводов. Сапфир обладает сравнительно низким поглощением ТГц излучения и характеризуется высокой твердостью, механической и термической стойкостью, а также химической инертностью и биосовместимостью. Кроме того, технология изготовления профилированных кристаллов (EFG – Edge-defined Film-fed Growth или метод Степанова) позволяет изготавливать длинные сапфировые стержни со сложным, заранее заданным поперечным сечением [7-9].

Пилотный образец сапфирового ТГц волновода содержит 7 цилиндрических каналов, образующих простую гексагональную решётку; см. Рис. 1 (а) [5]. Диаметр каждого канала составляет 2.5 мм; общий диаметр волновода – 12.0 мм. Данный волновод реализует принцип передачи излучения ARROW и характеризуется низкой дисперсией в диапазоне частот от 1.00 до 1.55 ТГц и минимальными потерями 2.0 дБ/м на частоте 1.45 ТГц.

Второй ТГц волновод имеет внешний диаметр 24 мм и диаметр центрального канала 7.15 мм; см. Рис. 1 (б) [6]. ФК данного волновода сформирована 30 полыми каналами с диаметром 1.6 мм, выстроенными в гексагональную решетку. Данный волновод позволяет передавать ТГц излучение в двухмодовом режиме, при этом для каждой моды наблюдается низкая дисперсия и потери до 1 дБ/м на частоте 1.2 ТГц. Более того, в работе [6] продемонстрирована возможность использования двухмодового сапфирового ТГц волновода для высокотемпературной внутриволноводной интерферометрии. Показано, что интерференционная картина поля на выходе волновода меняется при введении в его центральный канал малого количества вещества, а также в результате его фазовых превращений [6].

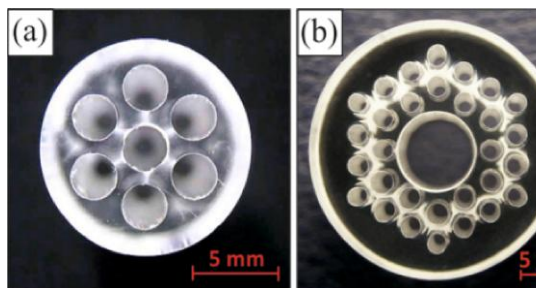


Рис. 1. Сапфировые ТГц волноводы, выращенные по методу EFG: (a) ARROW волновод [5]; (b) двухмодовый ФК волновод [6].

1. *Y.-S. Lee*, Principles of Terahertz Science and Technology (Springer, New York, NY, USA, 2009)
2. *M. Navarro-Cia et al.* Opt. Exp. 2013, **21**, 23748.
3. *K. Wang and D.M. Mittleman*, Nature, 2004, **432**, 376.
4. *M. Skorobogatiy and A. Dupuis*, Appl. Phys. Lett. 2007, **90**, 113514.
5. *K. I. Zaytsev et al.* IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016, **6**(4), 576-582.
6. *G.M. Katyba, K.I. Zaytsev, N.V. Chernomyrdin et al.* Adv. Opt. Mat., 2018, accepted, DOI: 10.1002/adom.201800573.
7. *Antonov, P.I., Kurlov, P.* Cryst. G. Char. Mat., 2002, **44**(2), 63–122.
8. *Abrosimov, et al.* P. Cryst. G. Char. Mat., 2003, **46**(1-2), 1-57.
9. *G.M. Katyba, K.I. Zaytsev, I.N. Dolganova et al.* P. Cryst. G. Char. Mat., 2018, accepted.

**Создание источников одиночных фотонов
на основе люминесцирующих алмазов,
синтезированных из адамантана**
О.С. Кудрявцев, Д.Г. Пастернак, А.М. Ромшин,
Е.А. Екимов, И.И. Власов
*ЦЕНИ ИОФ РАН, ОСПЯ,
лаборатория углеродной нанофотоники
E-mail: leolegk@mail.ru*

Синтез нано- и микро-размерных алмазов с различными центрами окраски является актуальной задачей для современной квантовой фотоники, поскольку на основе такого материала могут быть создаваться источники одиночных фотонов, работающих при комнатной температуре [1]. Наиболее перспективным является синтез наноалмазов при высоком давлении и температуре (НРНТ метод) из молекул такого органического соединения, как адамантан, строение которого повторяет кристаллическую решётку алмаза [2]. При этом, возможность встроить примесный атом в молекулу адамантана позволяет производить легированные алмазные нанокристаллы с заранее заданной концентрацией примеси, вплоть до одиночных примесных атомов. Азот является самой распространенной примесью в алмазе. В синтетических алмазах он обнаруживается преимущественно в форме одиночного атома, замещающего атом углерода в узле кристаллической решетки. Одиночный замещающий азот легко связывается с другим точечным дефектом алмазной решетки - вакансией, которая может возникать в алмазе в процесс его синтеза или при облучении высокоэнергетичными частицами. Образующийся комплекс азот-вакансия (в дальнейшем NV-центр) может находиться в различных зарядовых состояниях, два из которых, отрицательно заряженный центр с одним захваченным электроном NV^- и нейтральный NV^0 , являются оптически активными. Бесфононные линии этих центров находятся соответственно на длинах волн 637 и 575 нм, их фононные

крылья смещены в длинноволновую область и имеют достаточно большую ширину, более 100 нм. NV-центры являются наиболее интенсивно разрабатываемыми в настоящее время источниками одиночных фотонов в алмазе.

В настоящей работе изучается возможность контролируемого формирования одиночных NV-центров в алмазных кристаллах, синтезированных НРНТ методом при давлении 8-9 ГПа и температуре 1800 К из смеси адамантана ($C_{10}H_{16}$) и адамантанкарбонитрила ($C_{11}H_{15}N$), Органическое соединение $C_{11}H_{15}N$, являющееся производным от адамантана, используется в качестве источника азота. Характерные размеры полученных алмазных кристаллитов лежат в диапазоне 500 нм – 5 мкм. Изучены люминесцентные свойства 5 алмазных образцов, различающихся массовым содержанием адамантанкарбонитрила в исходной смеси, равным 100%, 15%, 5%, 2% и 0.1% (названия образцов соответствуют этому содержанию). Образец «100%» был синтезирован из чистого адамантанкарбонитрила. Установлено, что люминесцентные линии, связанные с различными азотсодержащими центрами, были значительно ниже по интенсивности линии Рамановского рассеяния алмаза, что может объясняться подавлением люминесценции большим содержанием азота в образце [3]. С уменьшением содержания адамантанкарбонитрила в спектрах образцов наблюдается многократное усиление люминесценции нейтральных и отрицательно заряженных NV-центров. Отдельные кристаллиты образца «0.1%» были рассеяны на стеклянной подложке и исследованы с помощью атомно-силового, сканирующего люминесцентного микроскопа и интерферометра Хенбери-Брауна-Твисса. Установлено, что азот достаточно равномерно распределен по объему образца, люминесценция наблюдалась практически от всех кристаллитов, ее интенсивность возрастала с размером кристаллита. Измерение корреляционной функции 2-го порядка ($g^{(2)}$ -функции) для интенсивности излучения самых маленьких алмазных

частиц (~ 500 нм) показало, что характерная величина «провала» $g^{(2)}$ функции для таких частиц составляет 50% (см. рис. 1(б)), что соответствует содержанию двух NV-центров в них.

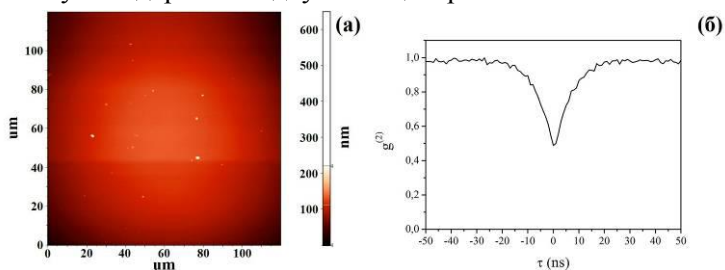


Рис. 1

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность контролируемого создания эмиттеров одиночных фотонов в алмазных кристаллах, синтезированных НРНТ методом из адамантана.

1. Jelezko F., Wrachtrup J., Phys. Status Solidi A. 2006, **203**, 3207-3225.
2. Ekimov E.A., Kudryavtsev O.S., Mordvinova N. et al. Chem. NanoMat. 2018, **4**, 269-273.
3. Vasil'ev E.A., Ivanov-Omskii V. I., Tech. Phys. Letters. 2004, **30**, 802–803.

Неорганические фториды для фотоники

С.В. Кузнецов, В.В. Воронов, А.А. Лугинина, М.Н. Маякова,

В.Ю. Пройдакова, В.С. Седов¹, А.К. Мартыанов¹,
В.Г. Ральченко¹, А.С. Низамутдинов², П.П. Федоров

*НЦЛМТ ИОФ РАН, отдел нанотехнологий,
лаборатория технологии наноматериалов для фотоники*

¹*ЦЕНИ ИОФ РАН*

²*Казанский федеральный университет*

E-mail: kouznetzovsv@gmail.com

Целью работы было исследование различных методик синтеза неорганических фторидов и изучение их спектрально-люминесцентных характеристик.

Методом осаждения из водных растворов были синтезированы твердые растворы на основе фторида кальция и фторида стронция, легированные редкоземельными элементами. Натрий-иттрий фторид и натрий-гадолиний фторид были также синтезированы в высококипящем органическом растворителе. Были определены квантовые выходы ап-конверсионной и даун-конверсионной люминесценции (в том числе quantum cutting) ($MF_2:Yb:R$, где $M=Ca, Sr$ и R – редкоземельные элементы) для различных матриц и различных легирующих компонентов на основе чего предложены перспективные составы. Разработаны композиты на основе фторидов с наноцеллюлозой и алмазом. Впервые была зарегистрирована рентгенолюминесценция композитов на основе алмаза.

**Плазмохимический синтез алмазных плёнок,
легированных изотопически чистым кремнием ^{28, 29, 30}Si**

А.К. Мартьянов, В.С. Седов, А.А. Хомич

ЦЕНИ ИОФ РАН,

отдел светоиндуцированных поверхностных явлений,

лаборатория алмазных материалов

E-mail: art.martyanov@gmail.com

Центры окраски в алмазе, излучающие в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, обеспечивают материальную базу для квантовых информационных технологий [1]. Отрицательно заряженный центр окраски кремний-вакансия (SiV⁻) в алмазе вызывает всё больший интерес для применений в нанофотонике благодаря своим превосходным спектральным свойствам, в том числе интенсивной бесфононной линии (БФЛ) на длине волны 737 нм в спектре фотолюминесценции (ФЛ). SiV-центры могут быть использованы в целях генерации одиночных когерентных неразличимых оптических фотонов для дальнейшей реализации эффективных узлов квантовых сетей. [2-3].

Для создания ансамбля идентичных SiV-излучателей с узкими несмещёнными линиями ФЛ следует минимизировать локальные напряжения среды эмиттеров, обеспечить моноизотопный состав примесного кремния и ближайших к нему атомов углерода в решётке алмаза.

Нами были выращены низконапряжённые эпитаксиальные алмазные плёнки в СВЧ плазме из газовой смеси CH₄-H₂ с добавлением SiH₄, изотопически обогащенного по каждому из трех изотопов ²⁸Si, ²⁹Si и ³⁰Si, и изучены спектральные свойства полученных SiV-центров при комнатной и низкой температурах.

Обнаружен спектральный сдвиг БФЛ в сторону меньших энергий с увеличением массы изотопа Si (рис. 1). Отжиг образцов при 1400°C значительно сужает ширину компонентов БФЛ из-за релаксации напряжения в плёнках. Показано, что интенсивность SiV линейно зависит от толщины легированной пленки, что позволяет

контролировать плотность распределения однофотонных эмиттеров. Установлено, что интенсивность излучения SiV для плёнок на поверхности (111), в которой находится диполь SiV, на порядок выше по сравнению с поверхностью (100). Было выполнено пространственное картирование ФЛ ^{28}SiV , идентифицированы и охарактеризованы локализованные однофотонные SiV-источники.

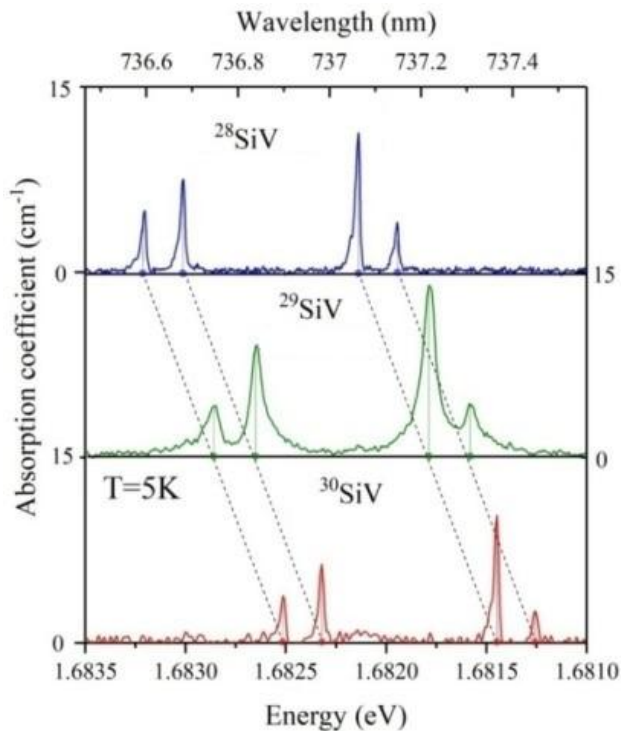


Рис. 1. Спектры поглощения изотопически чистых SiV-центров. Работа поддержана грантом РФФ № 14-12-01403.

1. Aharonovich I., Englund D., Toth M. Nature Photonics. 2016, **10**(10), 631.
2. Sipahigil A. et al. Physical Review letters. 2014, **113**(11), 113602.
3. Evans R.E. et al. Physical Review Applied. 2016, **5**(4), 044010.

**Плазмохимическое соосаждение
фаз алмаза и кристаллического германия
в смесях «метан-водород-герман»**

В.С. Седов, А.К. Мартьянов, А.А. Хомич

ЦЕНИ ИОФ РАН,

отдел светоиндуцированных поверхностных явлений,

лаборатория алмазных материалов

E-mail: sedovvadim@yandex.ru

Алмаз является материалом с рекордными теплопроводностью, твёрдостью, стойкостью к химическим и радиационным воздействиям, а также с низкой цитотоксичностью. Алмаз является широкозонным полупроводником, однако сильное легирование алмаза фосфором или бором на порядки снижает сопротивление алмаза до значений менее 1 Ом·см [1]. Также проводящим является ультрананокристаллическая (УНКА) форма алмаза [2]. Пористый проводящий алмаз интересен для задач силовой электроники и биомедицины в качестве высокоэффективных ионистров [3].

Одним из путей изготовления пористого алмаза является получение пористого композита из алмаза в сочетании с каким-либо веществом, неустойчивым к травлению кислотами. Так, в работе [3] был получен пористый поликристаллический алмаз с использованием в качестве исходного материала композита «Алмаз-SiC». Тем не менее, из-за особенностей встраивания кремния в алмазную решетку данная технология не позволяет изготовить монокристаллический пористый алмаз.

В нашей работе был использован аналогичный подход по изготовлению композита «Алмаз-Германий». Особенностью нашего метода является формирование фазы именно кристаллического германия кубической сингонии, а не фазы GeC. Синтез поликристаллических и монокристаллических алмазных плёнок с включениями Ge производился методом плазмохимического осаждения на установке ARDIS-100 (2.45 ГГц, до 5 кВт). При концентрации германа в газе более 10% GeH₄/CH₄ в получаемом материале была обнаружена новая кристаллическая фаза. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния было установлено, что эта фаза является кубическим германием (пик 300.5 см⁻¹). Атомы германия в 6 раз тяжелее атомов углерода, что позволяет различить

материалы на изображениях растрового электронного микроскопа (РЭМ), функционирующего в режиме регистрации обратно-рассеянных электронов (англ. backscattered electrons, BSE, Рис. 1). Данные РЭМ подтверждаются картами элементного анализа поверхности плёнок, полученные с использованием метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Поликристаллические алмазные плёнки были очищены от германиевой фазы в смеси плавиковой и азотной кислот, а образовавшиеся на месте кристаллитов германия пустоты были изучены в РЭМ. Установлено, что германий образует сложную трёхмерную канальную структуру по всей толщине композитной алмазной плёнки.

Использованный подход позволит в перспективе изготовить первый монокристаллический пористый алмаз макроскопических размеров для задач силовой электроники и биомедицины.

Работа поддержана грантом РФФИ №18-29-11023.

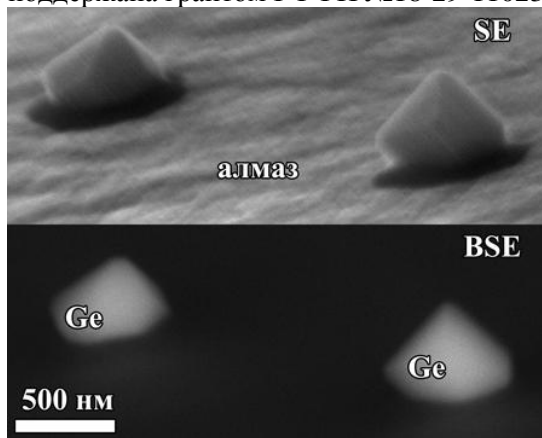


Рис. 1. Изображение РЭМ кристаллитов германия, сформировавшихся в СВЧ плазме в эпитаксиально-осаждённом монокристаллическом алмазном слое.

1. *Shakhov F.M., Abyzov A.M., Kidalov S.V. et al.* J. Phys. Chem. of Solids, 2017, **103**, 224-237.
2. *Vlasov I., Lebedev O.I., Ralchenko V.G. et al.* Adv. Mater. 2007, **19**, 4058-4062.
3. *Yang N., Foord JS., Jiang X.* Carbon. 2016; **99**, 90-110.

Структура и транспортные характеристики твердых электролитов на основе диоксида циркония

А.С. Числов^{2,3}, Н.Ю. Табачкова³, Ф.О. Милович³,
И.Е. Курицына¹, Е.Е. Ломонова², В.А. Мызина²,
М.А. Борик², А.В. Кулебякин²

¹Институт физики твердого тела РАН

²ИОФ РАН, отдел нанотехнологий, лаборатория Фианит

³НИТУ «МИСЦ»

E-mail: Chislov.artem@bk.ru

Материалы на основе ZrO_2 , совместно стабилизированные Sc_2O_3 и Y_2O_3 , используемые в твердооксидных топливных элементах, вызывают большой интерес, поскольку они обладают наивысшей ионной проводимостью среди твердых электролитов на основе ZrO_2 . Применение таких материалов позволяет понизить рабочую температуру топливного элемента до $800^\circ C$, что весьма важно для увеличения стабильности, ресурса эксплуатации и надежности электрохимических устройств. На практике твердые электролиты используются, в основном, в виде газоплотных керамических мембран, получаемых различными методами керамической технологии. Структурные, механические и электрические свойства таких керамических материалов в значительной степени зависят от их микроструктуры (размеров зерен, характера распределения компонентов твердого раствора по объему и границам зерен, наличия пор и т.д.), которые в свою очередь определяются технологическими условиями синтеза. В отличие от керамики, при получении материалов в виде монокристаллов, влияние этих факторов можно исключить.

Все исследования в данной работе выполнены на монокристаллических образцах. Методом направленной кристаллизации расплава были выращены монокристаллы твердых растворов на основе ZrO_2 , солегированные Sc_2O_3 и Y_2O_3 в широком диапазоне составов $(ZrO_2)_{1-x-y}(Sc_2O_3)_x(Y_2O_3)_y$ ($x = 0.003 \div 0.120$; $y = 0.005 \div 0.045$). Проведено исследование структуры и фазового

состава полученных кристаллов методами рентгенодифракционного анализа, просвечивающей электронной микроскопии и комбинационного рассеяния света. Транспортные характеристики кристаллов измеряли методом импедансной спектроскопии.

В работе показано, что получение однородных монокристаллов как полностью стабилизированного, так и частично стабилизированного диоксида циркония возможно при определенных концентрациях стабилизирующих оксидов. Так для получения монокристаллов полностью стабилизированного диоксида циркония суммарная концентрация стабилизирующих оксидов скандия и иттрия находится в интервале концентраций $10 \div 12$ мол.%, а для получения кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония в интервале $2.8 \div 4$ мол.%. Кристаллы с концентрациями вне указанных пределов содержали дефекты в объеме в виде трещин и включений и не представляли интереса для практического использования.

Кристаллы полностью стабилизированного диоксида циркония обладали высокой микротвердостью и низкой трещиностойкостью. При увеличении содержания суммарной концентрации стабилизирующих оксидов и содержания оксида иттрия значение микротвердости кристаллов увеличивается. Но увеличение содержания Y_2O_3 в твердых растворах приводило к необходимости уменьшения максимальных нагрузок на индентор, которые выдерживает образец без появления трещин.

Сопоставление данных о фазовом составе кристаллов полностью стабилизированного диоксида циркония, полученных разными методами исследования показало, что кристаллы, которые идентифицируются по данным рентгеновской дифрактометрии как кубические, на самом деле имеют тетрагональную структуру t'' -фазы, которая возникает из-за небольшого смещения атомов кислорода в анионной подрешетке вдоль оси c .

Исследование транспортных характеристик кристаллов полностью стабилизированного диоксида циркония показало, что солегирование Y_2O_3 влияет на проводимость кристаллов различным образом и зависит от содержания Sc_2O_3 в исходном составе. При фиксированных значениях Sc_2O_3 в солегированных кристаллах максимальной проводимостью обладают составы с суммарной концентрацией стабилизирующих оксидов 10 мол. %: 10 мол. Sc_2O_3 ; 9 мол. % Sc_2O_3 и 1 мол. % Y_2O_3 ; 8 мол. % Sc_2O_3 и 2 мол. % Y_2O_3 , 7 мол. % Sc_2O_3 и 3 мол. % Y_2O_3 .

Фазовый анализ кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония показал, что во всех исследуемых кристаллах присутствовали две тетрагональные фазы диоксида циркония t и t' . Судя по данным о степени тетрагональности t -фаза является трансформируемой, и при воздействии механических напряжений может подвергаться мартенситному переходу в моноклинную форму. А t' - фаза с соотношением $c/a - 1.004 \div 1.005$ не будет испытывать тетрагонально-моноклинного перехода. При увеличении суммарной концентрации стабилизирующей примеси незначительно увеличивается количество t' -фазы и уменьшается количество t -фазы. Исследование методом ПЭМ показало, что структура всех частично стабилизированных кристаллов двойниковая, областей свободных от двойникования нет. Плоскостью двойникования является плоскость $\{110\}$. Исследование механических свойств кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония показало высокие значения микротвердости и трещиностойкости. Значения трещиностойкости для кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония превышают значения трещиностойкости кристаллов полностью стабилизированного диоксида циркония в 4-5 раз. Высокие значения трещиностойкости кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония обусловлены наличием двойников и механизмом трансформационного упрочнения, за который ответственна трансформируемая t -фаза.

Значения проводимости кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония для всех исследуемых составов довольно близки. Для кристаллов содержащих суммарную концентрацию стабилизирующих оксидов иттрия и скандия от 3.2 до 4 мол.% значения проводимости при температуре 1173 К составляют порядка $0.03 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Несмотря на то, что значения проводимости кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония меньше значений проводимости для полностью стабилизированного диоксида циркония в 3-5 раз, кристаллы исследованных составов имеют значения проводимости в 1.5-2 раза выше по сравнению с проводимостью кристаллов стабилизированных только оксидом иттрия, при сопоставимых концентрациях. Высокие значения микротвердости и трещиностойкости полученные для кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония могут позволить использовать данные составы для электролитических мембран, позволяя существенно уменьшить их толщину и тем самым снизить сопротивление.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №16-13-00056.

Секция 4
ФИЗИКА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

**Термопрограммируемый синтез
монокристаллов азотированного графена
из молекул ацетонитрила**

С.Л. Коваленко, Т.В. Павлова, О.И. Канищева, К.Н. Ельцов
ЦЕНИ ИОФ РАН, ОТИАМ, Лаборатория физики поверхности
E-mail: stanislav.l.kovalenko@gmail.com

Представлено СТМ-исследование азотированного графена, синтезированного на поверхности Ni(111). Цель исследования – разработка технологической карты для эпитаксиального роста N-легированных монокристаллов монослойного графена на поверхности Ni(111) в условия сверхвысокого вакуума; выявление и идентификация атомных дефектов, связанных с внедрением азота в атомную решетку графена. Все точечные (атомные) дефекты, наблюдаемые в азотированном графене на поверхности Ni(111), можно разделить на четыре группы: структурные (вакансии и дефекты Стоуна-Вэлса), дефекты внедрения атомов никеля, дефекты, связанные с атомами остаточных примесей, и собственно дефекты внедрения атомов азота в решетку графена. Термопрограммируемый рост (ТПР) эпитаксиального N-легированного монослойного графена включает в себя: 1) насыщение приповерхностной области образца Ni(111) углеродом с сохранением чистоты самой поверхности; 2) адсорбцию ацетонитрила (C_2H_3N) при температуре от $-15^{\circ}C$ до $0^{\circ}C$ дозой около 2000 Ленгмюр; 3) быстрый (флеш) прогрев образца до $140^{\circ}C$; 4) отжиг образца при $400^{\circ}C$. Для получения квазисвободного графена проводят интеркаляцию золота в интерфейс графен/Ni(111) [1]. Условия интеркалирования: напыление золота на поверхность при комнатной температуре, отжиг в течение 15 мин при $450^{\circ}C$. Для выделения дефектов, связанных с остаточным загрязнением образца и с внедрением атомов никеля при синтезе, был дополнительно изучен монослой нелегированного графена, синтезированный

90

методом ТПР из пропилена [2]. Все технологические операции, анализ структуры и элементного состава поверхности проводились в единой сверхвысоковакуумной установке, оснащенной электронным оже-спектрометром (ЭОС), дифрактометром медленных электронов (ДМЭ), сканирующим туннельным микроскопом (СТМ), квадрупольным масс-спектрометром, системой напуска газов и системой прогрева образцов. Для идентификации дефектов в графене снимались СТМ-изображения в широком диапазоне туннельных напряжений $U_t = (-1.30 \div +1.00)$ В и затем сравнивались с расчетными изображениями, полученными с использованием теории функционала плотности.

Установлено, что точечных структурных дефектов в нелегированном и азотированном графенах практически нет. На поверхности нелегированного графена, в основном, наблюдаются дефекты внедрения атомов Ni, как одиночные, так и объединенные в цепочки [2]. Помимо никелевых дефектов встречаются дефекты загрязнения в количестве существенно меньшем 1%. Поскольку характерными остаточными примесями в никеле являются С и S, можно полагать, что дефекты загрязнения связаны с атомами серы. На поверхности азотированного графена нами были выявлены новые типы дефектов, которые мы связали с наличием азота в решетке графена. Полученные СТМ-изображения азотных дефектов можно разделить на три типа: дефекты, имеющие вид темной точки в диапазоне туннельных напряжений $-230 \div +480$ мВ и сливающиеся с изображением графена при $U_t = -1300 \div -230$ мВ и $U_t = +230 \div +1000$ мВ (тип 1); яркие дефекты тригональной симметрии, наблюдаемые при всех U_t (тип 2) и сдвоенные дефекты в виде яркой точки рядом с которой располагается темная точка (тип 3). Сравнение с расчетными СТМ-изображениями позволяет утверждать, что дефекты первого типа являются дефектами замещения атома углерода атомом азота в положении fcc над поверхностью Ni(111). Дефекты второго типа мы относим к

дефектам замещения атома углерода атомом азота в положении *on-top* над поверхностью Ni(111). Основанием такого отнесения является наблюдение тригональной симметрии дефекта и положение центра дефекта *on-top*. Дефекты третьего типа мы относим к пиридиновым дефектам, т.к. они имеют зеркальную симметрию и имеют схожий вид с расчетными СТМ-изображениями пиридиновых дефектов. СТМ-исследование поверхности показало, что концентрация азотных дефектов приблизительно 0.3%.

Полученный квазисвободный азотированный графен в результате интеркаляции золота в интерфейс N-Gr/Ni(111) содержит концентрацию дефектов приблизительно 0.3% (по данным обработки СТМ-изображений). Для сравнения: квазисвободный нелегированный монослой графена (Gr/Au/Ni(111)) имеет концентрацию дефектов менее 0.01%. Отчетливо наблюдается сверхструктура Ni(111)-9.6×9.6-Au, позволяющая утверждать формирование интерфейса с плотностью монослойного покрытия золота между N-графеном и поверхностью Ni(111).

Данная работа поддержана грантом РФФИ № 16-02-00050.

1. *Usachov D., Vilkov O., Gruneis A. et al.* Nano Letters 2011, **11**, 5401.
2. *С.Л. Коваленко, Т.В. Павлова, Б.В. Андрюшечкин и др.* Письма в ЖЭТФ 2017, **105** (3), 170-174.

**Адсорбция йода на поверхность Ni(100):
структурные фазовые переходы и реконструкция**
Н.С. Комаров, Т.В. Павлова, Б.В. Андриюшечкин
ЦЕНИ ИОФ РАН, ОТИАМ, лаборатория физики поверхности
E-mail: nikita.komarov@kapella.gpi.ru

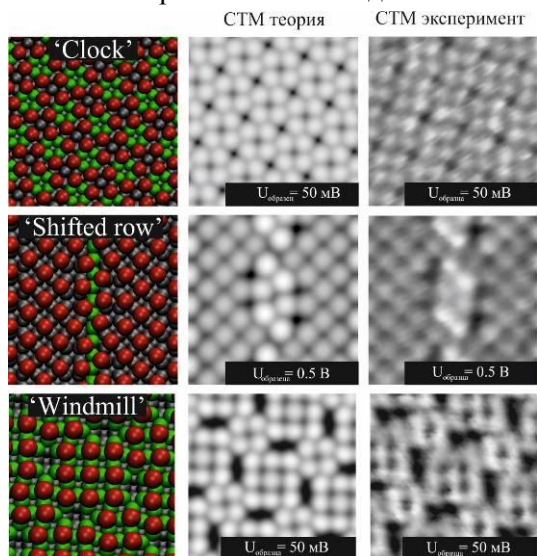
Йод, адсорбированный на поверхности никеля, формирует большое многообразие поверхностных решеток. В этой связи система I/Ni оказывается привлекательной в качестве модельной для изучения фазовых переходов в двумерных системах [1-3]. Недавно нами было показано, что в системе I/Ni(111) при увеличении степени покрытия происходит переход из соразмерной фазы ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30° в несоизмерную фазу, причем механизм перехода подразумевает формирование линейных доменных стенок [3].

В данной работе представлены результаты исследования адсорбции молекулярного йода на поверхность Ni(100) методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), дифракции медленных электронов (ДМЭ), а также результаты моделирования атомной структуры поверхности, выполненные в рамках теории функционала плотности (ТФП) с использованием программного пакета VASP. Хотя система I/Ni(100) была подробно изучена ранее дифракционными методами [1, 2], картина фазовых переходов на атомном уровне в реальном пространстве установлена не была.

Согласно СТМ данным, простая структура $p(2 \times 2)$ образуется при покрытии 0.25 монослоя (МС). Вычисления, проведенные методом ТФП, показали, что полносимметричный центр между четырьмя атомами никеля, является энергетически наиболее выгодным. Дальнейшее увеличение степени покрытия поверхности йодом, приводит к появлению зигзагообразных сверхплотных доменных стенок, разделяющих соседние антифазные домены $p(2 \times 2)$. Увеличение степени покрытия в диапазоне $0.26 < \theta < 0.44$ МС приводит к образованию на поверхности Ni(100) ряда сменяющих друг друга хемосорбированных фаз: $c(3 \times 2)$, $c(8 \times 2)$, $c(5 \times 2)$. Фазовый

переход между поверхностными структурами может быть описан в терминах одноосного сжатия слоя йода вдоль направлений $[011]$ и $[0\bar{1}\bar{1}]$ подложки.

Увеличение степени покрытия выше 0,44 МС приводит к реконструкции поверхности Ni(100). На рисунке представлены СТМ-кадры, записанные с атомным разрешением, реконструкций типа 'clock', 'shifted row' и 'windmill'. Используя ТФП моделирование, мы построили атомные модели реконструкций и рассчитали теоретические СТМ-изображения (см. рисунок), которые находятся в согласии с экспериментальными данными.



Дальнейшая экспозиция йода на поверхность Ni(100), приводит к зародышеобразованию и формированию пленки йодида никеля.

1. Somerton C., Mcconville C.F., Woodruff D.P., Jones R.G., Vacuum 1983, **33**, 858.
2. Jones R.G., Mcconville C.F., Woodruff D.P., Surf. Sci. 1983, **127**, 424.
3. Komarov N.S., Pavlova T.V., Andryushechkin B.V., Surf. Sci. 2016, **651**, 112.

Узкие полосы графена внутри одностенных углеродных нанотрубок

А.И. Чернов, П.В. Федотов, Е.Д. Образцова

ЦЕНИ СПЯ ИОФ РАН,

лаборатория спектроскопии наноматериалов

E-mail: al.chernov@nsc.gpi.ru

Полосы графена – это углеродный нано-размерный материал с sp^2 -гибридизацией, обладающий уникальными физическими и химическими свойствами. Электронные свойства полос графена зависят от их ширины, геометрии и формы краев [1]. В частности, для полос с полупроводниковым типом проводимости уменьшение ширины увеличивает их запрещенную зону [2]. Полосы графена с шириной менее 2 нм являются наиболее интересными объектами с физической точки зрения, так как позволяют наглядно проследить переход от двумерного объекта к одномерному и исследовать квантово-размерные эффекты.

Теоретически было показано, что величина запрещенной зоны полосы шириной менее 1 нм может достигать нескольких эВ. Для получения протяженных полос графена с шириной менее 1 нм существует только один метод, основанный на использовании одностенных углеродных нанотрубок (ОУН) в качестве нанореакторов для проведения реакций полимеризации внутри [3-6]. Внутренний объем нанотрубки используется для синтеза материалов и выступает в роли поддерживающей матрицы для инкапсулированных структур. Благодаря этому инкапсулированные структуры оказываются защищенными от внешних воздействий, а поддерживающая внешняя матрица позволяет формировать новые одномерные нанообъекты. В зависимости от молекул, которые помещаются внутрь и участвуют в реакции полимеризации, возможно создавать полосы с различными атомами вдоль краев полос. Изменение формы, а также размещение дополнительных атомов на краях приводит к значительному изменению электронных свойств. К примеру, в случае помещения атомов водорода вдоль краев, полосы являются полупроводниками, а при наличии атомов серы – становятся металлическими. Экспериментально было продемонстрировано, что наличие концевых атомов, ограничивающих полосы, является обязательным условием для их стабильности. Размещение атомов, отличных от углерода, вдоль

краев полос позволяет варьировать свойства наноматериала. Нами было экспериментально продемонстрировано, что полосы с атомами водорода на концах обладают запрещенной зоной, зависящей от ширины полосы [4]. При синтезе полос графена внутри ОУН свойства созданного нанокompозитного материала во многом зависят от параметров самих нанотрубок. ОУН обладают физическими свойствами, которые определяются их геометрией. Использование внешних нанотрубок с различными параметрами, такими как диаметр и тип электронной проводимости позволяют варьировать электронные и оптические свойства нанокompозитов [7].

Оптическая спектроскопия является удобным инструментом для исследования свойств углеродных наноматериалов. Полосы графена были исследованы при помощи спектроскопии комбинационного рассеяния света, спектроскопией поглощения света и фотолюминесцентной спектроскопией. Просвечивающая электронная микроскопия позволила подтвердить факт заполнения каналов нанотрубок и формирование полос графена внутри.

Проведенный цикл работ позволил изучить фундаментальные свойства углеродных наноструктур, которые создаются внутри одностенных нанотрубок. Полосы графена с шириной менее 2 нм обладают перспективными оптическими свойствами и могут быть использованы в качестве фотодетекторов.

Исследования проведены при поддержке РФФИ в рамках проекта №18-02-01099.

1. *Nakada K., Fujita M., Dresselhaus G. et al.* Phys. Rev. B 1996, **54**, 17954.
2. *Han M.Y., Oezylmaz B., Zhang Y. et al.* Phys. Rev. Lett. 2007, **98**, 206805.
3. *Chuvilin A., Bichoutskaia E., Gimenez-Lopez M.C. et al.* Nat. Mater. 2011, **10**, 687.
4. *Chernov A.I., Fedotov P.V., Talyzin A., et al.* ACS Nano 2013, **7**, 6346-6353.
5. *Chernov A.I., Fedotov P.V., Anoshkin I.V. et al.* Phys. Stat. Sol. (B) 2014, **251**, 2372-2377.
6. *Chernov A.I., Fedotov P.V., Krylov A.S. et al.* J. of Nanophot. 2016, **10**, 012504.
7. *Chernov A.I., Fedotov P.V., Lim H.E. et al.* Nanoscale 2018, **6**, 2936-2943.

Секция 5 ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Оптическая эмиссионная спектроскопия СВЧ плазмы в процессах синтеза монокристаллов алмаза

из газовой фазы

И.А. Антонова^{1,2}, В.Ю. Юров^{1,2}, Е.В. Бушуев²,
А.П. Большаков^{1,2,3}, Е.Е. Ашкинази², В.Г. Ральченко^{1,2,3}

¹НИЯУ «МИФИ»,

²ЦЕНИ ИОФ РАН,

*отдел светоиндуцированных поверхностных явлений,
лаборатория алмазных материалов*

³Harbin Institute of Technology, Harbin, P.R. China

E-mail: yil2276@gmail.com

Растущий интерес к монокристаллическому (МК) алмазу, получаемому методом MPCVD (Microvawe plasma chemical vapor deposition) объясняется возможностью его использования для широкого спектра современных приложений. Контроль за качеством, скоростью роста, плотностью вкладываемой мощности и другими важнейшими параметрами необходим на этапе синтеза алмаза в СВЧ плазме (реактор ARDIS-100; 2,45 ГГц; 5 кВт, ЗАО «Оптосистемы»).

Для реализации задачи увеличения скорости роста монокристаллов алмаза (МК) без потери его качества, в рабочую смесь H_2-CH_4 была введена небольшая добавка инертного газа Ar. Скорость роста при этом увеличилась до 105 мкм/ч. Ширина пика в спектре комбинационного рассеяния выращенного кристалла составила $1,7 \text{ см}^{-1}$, что свидетельствует о высоком качестве полученных образцов.

С помощью оптической эмиссионной спектроскопией (ОЭС) с пространственным разрешением порядка 1 мм, определены пространственные профили интенсивностей линий H_α (656 нм) и C_2 (516 нм) в плазме. Такое профилирование компонент плазменного облака позволяет узнать об объеме СВЧ плазмы и, следовательно, о

плотности вкладываемой мощности СВЧ разряда, которая составила 300 Вт/см^3 для обычных метан-водородных смесей при давлении 150 Торр. Плотность мощности в значительной степени определяет интенсивность и равновесие динамическое плазмохимических процессов в разряде и поэтому является его важнейшей характеристикой.

Был реализован также экспресс метод измерения объема плазмы, использующий цифровую фотосъемку (Canon EOS 650D) через H_{α} -фильтр ($653 \pm 6 \text{ нм}$). Он пропускал только излучение H_{α} линии в излучении плазмы и по фотоизображению можно оценить размеры плазмы по всем трем координатам.

В результате было показано, что при типичных параметрах разряда, при увеличении СВЧ мощности, объем разряда также увеличивается, в результате чего величина плотности СВЧ мощности оставалась примерно постоянной, или немного снижалась, демонстрируя своего рода самосогласованный процесс.

По форме пьедестала в спектре ОЭС снятого дифракционным спектрометром Ocean Optics HR4000 определено распределение температуры вдоль оси X (параллельно поверхности образца) на расстоянии $Z=12 \text{ мм}$ над образцом. Центр плазменного облака является самой горячей областью, температура которой составляет $3400 \pm 300 \text{ К}$. Приближаясь к краю плазмы, температура спадает до $2400 \pm 300 \text{ К}$.

Более точный способ определения температуры газа в плазме состоит в измерении вращательной температуры T_{rot} димера C_2 (полоса около $516,5 \text{ нм}$), находящейся в равновесии с поступательной температурой. Вращательная температура определяется из анализа вращательных компонент полосы Свана C_2 в спектре излучения плазмы. В случае теплового равновесия интенсивность вращательные линии излучения, связаны с вращательной температурой T_{ro} через соотношение

Больцмана. Так например для случая смеси $H_2+10\%CH_4$ и СВЧ мощности $P=2,93$ кВт была определена вращательная температура $T_{rot}=3500\pm 150K$, точность измерения составила 4%.

Используя низкокогерентную интерферометрию, была получена температурная зависимость скорости травления для CVD и НРНТ образцов монокристаллических алмазов в СВЧ-плазме в чистом водороде. Кинетика травления была определена при высоких температурах вплоть до $1370^\circ C$, при давлении 130 Торр. Это позволило рассчитать энергию активации травления E_a . В частности, она оказалась равной 42 ± 5 и 32 ± 4 Ккал моль⁻¹ для CVD и НРНТ образцов, соответственно.

При травлении алмаза в чистой водородной плазме в оптических эмиссионных спектрах плазмы были обнаружены линии радикалов СН и C_2 . Их интенсивность зависела почти линейно от температуры подложки и скорости травления. Таким образом интенсивности излучение линий СН и димера C_2 могут так же использоваться как индикатор процесса травления алмаза не только в плазме H_2 , но и потенциально также в других реактивных газах и смесях.

1. *A.P. Bolshakov et al. Diam. Relat. Mater. 2016, 62, 49-57.*
2. *E.V. Bushuev et al. Diam. Relat. Mater. 2016, 66, 83-89.*
3. *E.V. Bushuev et al. Diam. Relat. Mater. 2017, 72, 61-70.*
4. *V.Y. Yurov et al. Phys. Status Solidi A, 2017, 1700177.*

Спектры излучения плазменной несимметричной вibratorной антенны

Н.Н. Богачев, С.Е. Андреев*

ИОФ РАН, теоретический отдел

отдел физики плазмы, лаборатория плазменной электроники

E-mail: bgniknik@yandex.ru

Плазменные антенны – класс антенн, в котором в качестве волноведущих, излучающих и управляющих элементов используется плазма [1-4]. Исследование плазменных антенн направлены на решение задач современной радиотехники, таких как: создание интеллектуальных антенн с безынерционным управлением характеристиками; снижение радиолокационной заметности антенных устройств объектов вооружения и военной техники; повышение защищенности радиотехнических систем от воздействий средств радиоэлектронной борьбы и поражения атмосферными электрическими разрядами.

В развитии плазменных технологий в антенной технике можно выделить несколько направлений. Самое обширное и перспективное направление – плазменные антенны из газоразрядных трубок. Оно включает в себя работы над различными типами антенн. В данной работе исследуется плазменная несимметричная vibratorная антенна (ПНВА). Такая антенна представляет собой аналог металлической несимметричной vibratorной антенны (МНВА), и состоит из штыря, соединённого с центральным проводником коаксиального кабеля, и проводящего диска, соединённого с внешним проводником коаксиально кабеля. В случае плазменной антенны металлический штырь заменён на газоразрядную трубку с плазмой. Оптимальной длиной штыря считается $l_a = \lambda/4$. Несмотря на то, что ПНВА исследуется с 1999 года [1-5], ещё остаётся ряд актуальных вопросов, в том числе исследование шумов и нелинейных искажений излучаемого сигнала ПНВА [6-7].

Важным отличием плазменной антенны от аналогичной

металлической является различие взаимодействия металла и газоразрядной плазмы с электромагнитными волнами в ВЧ и СВЧ диапазонах. Плазма газового разряда в люминесцентной лампе низкого давления имеет электронную концентрацию в диапазоне $n_e \approx 10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$, данной концентрации соответствует частота ленгмюровских колебаний $f_p \approx 10^9 \div 10^{11} \text{ Гц}$, данные значения попадают в диапазоны ВЧ, СВЧ и близкие к ним. Данное обстоятельство приводит к необходимости исследования влияния параметров плазмы на сигнал плазменной несимметричной вибраторной антенны. Цель исследования – изучения спектров немодулированного и модулированного сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной (с двумя вариантами подачи сигнала на антенну) и сравнение их со спектрами аналогичной металлической антенны.

В докладе представлены результаты экспериментальных измерений и численного моделирования. С помощью созданного стенда проводились экспериментальные измерения спектров немодулированного и модулированного (применялась частотная модуляция) сигнала ПНВА и МНВА. Численное моделирование излучения немодулированного сигнала ПНВА проводилось в электромагнитном коде КАРАТ с использованием метода конечных разностей во временной области (МКРВО, FDTD) и модели плазмы с использованием PIC метода.

Полученные спектры излучения немодулированного сигнала позволяют оценить, что величина потерь энергии на создание плазмы в ПНВА с помощью излучаемой электромагнитной волны составляет менее 27%. В спектре ПНВА обнаружено нелинейное усиление кратных гармоник частоты излучаемого сигнала в сравнении с спектром сигнала МНВА, обусловленные нелинейностью плазмы и зависит от способа подачи сигнала. Использование согласующего перехода при использовании коаксиального кабеля существенно снижает нелинейные искажения.

В рамках проведённого исследования излучения частотно-модулированного сигнала плазменной и металлической несимметричными вибраторными антеннами было показано, что модулированный сигнал, излучаемый плазменной антенной, не уступает по качеству сигналу от металлической антенны. Мощность нелинейных комбинационных частот в спектре ЧМ-сигнала ПНВА заметно ниже, чем в спектре сигнала, излучаемого МНВА. В спектре детектированного сигнала видно снижение мощности на второй гармонике частоты модулирующего колебания для сигнала от плазменной антенны в сравнении с сигналом от металлической антенны.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н., профессору Гусейн-заде Н.Г., д.ф.-м.н., профессору Игнатову А.М., к.ф.-м.н. Богданкевич И.Л. и к.ф.-м.н. Сергейчеву К.Ф. за помощь в проведении исследований и консультации. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-08-00859 а.

1. *Borg G.G., Harris J.H., Miljak D.G. and Martin N.M.* Applied physics letters. 1999. **74**(22), 3272-3274.
2. *Овсяников В.В.* Радиофизика и радиоастрономия. 2001. **6**(3), 261-267.
3. *Rayner J.P., Whichello A.P., Cheetham A.D.* IEEE Transactions on plasma science. 2004, **32**(1), 269.
4. *Alexeff I., Anderson T., Parameswaran S., Pradeep E.P., Hulloli J. and Hulloli P.* IEEE Trans. on plasma science. 2006, **34**(2), 166.
5. *Истомин Е.Н., Карфидов Д.М., Минаев И.М., Рухадзе А.А., Тараканов В.П., Сергейчев К.Ф., Трефилов А.Ю.* Физика плазмы. 2006, **32**(4), 423.
6. *Bogachev N.N.* Journal of Physics: Conference Series. 2015, **661**, 012054.
7. *Belyaev B.A., Leksikov A.A., Leksikov A.A., Serzhantov A.M. and Bal'va Y.F.* IEEE Trans. on Plasma Science. 2014, **42**(6), 1552.

Эксперименты с модернизированным гиротронным комплексом на стеллараторе Л-2М

Д.Г. Васильков
ИОФ РАН, отдел физики плазмы
E-mail: lhdlhd81@mail.ru

На стеллараторе Л-2М (ИОФ РАН) проводятся эксперименты по исследованию создания и нагрева высокотемпературной плазмы с помощью мощных импульсов СВЧ-излучения методом электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР).

Л-2М – классический стелларатор средних размеров, кроме ЭЦР-нагрева плазмы в экспериментах также возможно использование омического нагрева [1]. Электронная температура плазмы в экспериментах достигает 2 кэВ, максимальная энергия плазмы 800 Дж, средняя электронная концентрация $(0.5 \div 3) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Модернизированный комплекс МИГ-3 состоит из двух гиротронов, осуществляющих создание и нагрев плазмы на второй гармонике гирочастоты (75 ГГц) с максимальной мощностью соответственно 800 и 700 кВт. В экспериментах объемный вклад мощности методом ЭЦР-нагрева достигал 3 МВт/м^3 , что является мировым рекордом [2].

Гиротронный комплекс МИГ-3 также позволяет осуществлять различную временную модуляцию импульсов СВЧ-излучения. Исследовались два базовых режима модуляции. В первом с помощью одного гиротрона низкой мощности создавалась первичная плазма, а второй гиротрон с высокой мощностью осуществлял дальнейший ее нагрев. Во втором случае проводились эксперименты с импульсно-периодическим режимом работы одного гиротрона (дававшего последовательность кратковременных импульсов СВЧ-излучения с паузами между ними, причем имеется возможность варьировать число импульсов в разряде, а также длительности их и пауз между ними).

В экспериментах использовался весь диагностический комплекс установки, включающий в себя измерение глобальных, профильных и локальных параметров плазмы, в частности, регистрировалась энергия и поглощенная мощность нагрева, пространственное распределение электронной концентрации,

радиальные профили электронной температуры, характеристики электрических полей в краевой области, а также характеристики рассеяния гиротронного излучения на флуктуациях плотности [3] рис. 1.

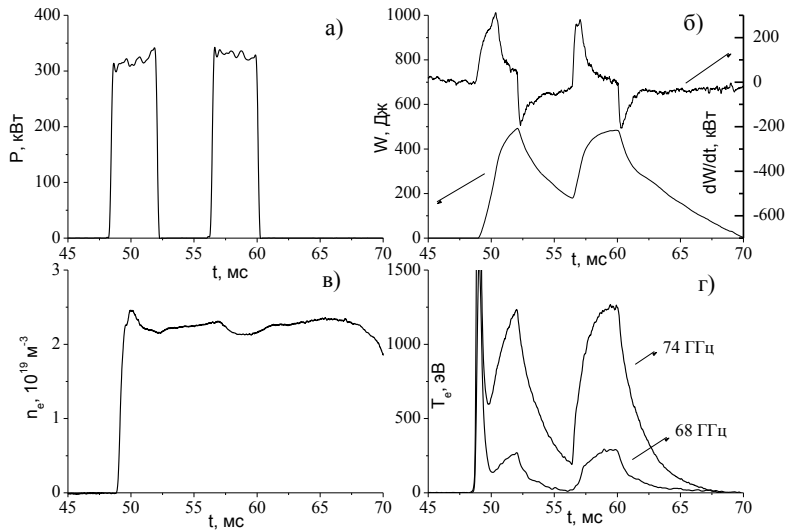


Рис. 1. Временная эволюция основных параметров плазмы в импульсно-периодическом режиме модуляции ЭЦР-нагрева: (а) мощность ЭЦР-нагрева; (б) энергия плазмы и ее временная производная; (в) средняя по диаметру электронная плотность; (г) электронная температура в центральной области плазмы (ЭЦР излучение на частоте 74 ГГц) и в краевой области (68 ГГц).

Данный режим работы позволил исследовать временную динамику ЭЦР нагрева и удержания плазмы в стеллараторе и, соответственно, ее охлаждения и распада после выключения нагрева. Обнаружено явление быстрого ухудшения удержания на стадии нагрева. Установлено, что энергетические потери при выключении нагрева ниже, чем при нагреве при той же энергии плазменного шнура.

1. *Abrakov V.V., Akulina D.K., Andryukhina E.D. et al, Nuclear Fusion, 1997, 37, 233.*

2. *Batanov G.M., Belousov V.I., Bondar' Yu.F. et al*, Plasma Physics Reports, 2013, **39**, 1088.
3. *Batanov G.M., Borzosekov V.D., Grebenshchikov S.E. et al*. 45th EPS Conference on Plasma Physics 2 - 6 July 2018 Prague, Czech Republic. P4.1099.

Плазменный СВЧ-усилитель шумов релятивистского электронного пучка

Д.Е. Диас Михайлова, И.Е. Иванов, П.С. Стрелков,

В.П. Тараканов, Д.В. Шумейко

*ИОФ РАН, отдел физики плазмы,
лаборатория плазменной электроники*

E-mail: diasmikhaylovade@mail.ru

Известны мощные источники сверхширокополосного излучения, основанные на преобразовании мощного высоковольтного электрического видеоимпульса в излучение, см., например, [1]. В этих устройствах характерная частота излучения определяется длительностью видеоимпульса и составляет, как правило, не более 1 ГГц. Увеличение частоты возможно только за счет уменьшения длительности видеоимпульса, что приводит к уменьшению энергии СВЧ-излучения. Обычно энергия СВЧ-импульсов таких источников с одной антенной не превышает 0.2 Дж. В плазменном сверхширокополосном СВЧ-источнике средняя частота определяется плотностью плазмы и не связана с длительностью импульса. Поэтому увеличение длительности импульса тока РЭП приводит к увеличению энергии СВЧ-импульса. Кроме того, возможна быстрая перестройка средней частоты излучения, характерное время перестройки частоты 1 мс.

Сверхширокополосный плазменный источник основан на усилении собственных шумов сильноточного релятивистского электронного пучка (500 кэВ, 2 кА, 500 нс) при инъекции его в плазму.

Были получены сверхширокополосные СВЧ импульсы $2 \Delta f / (f_{\min} + f_{\max}) = 0.55 > 0.2$. Энергия СВЧ импульсов превышает 5 Дж. Длительность СВЧ импульсов составляет 200 – 300 нс. Средняя частота перестраивается при изменении плотности плазмы от 2.2 до 3.8 ГГц.

На представленном ниже рисунке 1 показана зависимость средней частоты излучения от плотности плазмы.

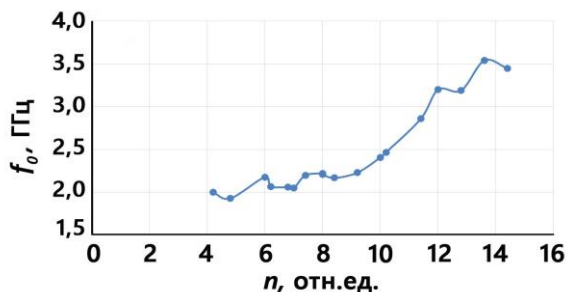


Рис.1. Зависимость средней частоты излучения от плотности плазмы

Здесь средней частотой излучения мы называем частоту f_0 , при которой энергия СВЧ импульса на частотах менее f_0 равна энергии на частотах более f_0 .

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №16-08-00439.

1. *В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев*
Сверхширокополосные импульсные радиосистемы.
Новосибирск: "Наука", 2015. с.481
2. *Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В.* Физика плазмы. 2016, **42**, № 7, 644-648.

Изменение полоидальной скорости вращения плазмы при ЭЦР нагреве с помощью двух гиротронов

К.А. Ким, А.А. Харчевский, Н.Н. Скворцова.

ИОФ РАН, отдел физики плазмы, лаборатория «РАМУС»

E-mail: k.kim@mtc-tel.ru

Целью данной работы является измерение полоидальной скорости вращения плазмы в стеллараторе Л-2М методом доплеровской рефлектометрии [1] при нагреве плазмы с помощью двух гиротронов комплекса МИГ-3 [2] на частоте около 75 ГГц.

Исследование проводилось на установке магнитного удержания плазмы стеллараторе Л-2М с использованием системы доплеровской рефлектометрии [3]. Метод данной диагностики основан на полном отражении электромагнитных волн от плазмы при определенной плотности и частоте (эффект отсечки). При отражении электромагнитной волны от движущейся отражающей поверхности плазмы возникает эффект Доплера – изменение частоты принимаемых волн по сравнению с излучаемыми при относительном движении источника радиоволн и облучаемого физического объекта.

В результате исследования были получены данные об изменении полоидальной скорости вращения плазмы в течение определенных промежутков времени при различных режимах ее нагрева. Экспериментальные данные были получены с учетом погрешности измерения 10%. Оказалось, что амплитудная часть комплексного Фурье-спектра отражённого сигнала доплеровского рефлектометра изменяется в зависимости от режима электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы.

Экспериментально полученные данные об изменении скорости полоидального вращения плазменного шнура представлены на рис. 1.

Кроме изменения полоидальной скорости вращения во время существования плазмы, изменяется и ширина спектра отражённого от плазмы сигнала в моменты импульса гиротронов, что может

свидетельствовать о наличии флуктуаций плотности различной природы. Исследование и анализ процессов, формирующих разницу в спектрах, будут проведены в ходе научной работы над магистерской диссертацией.

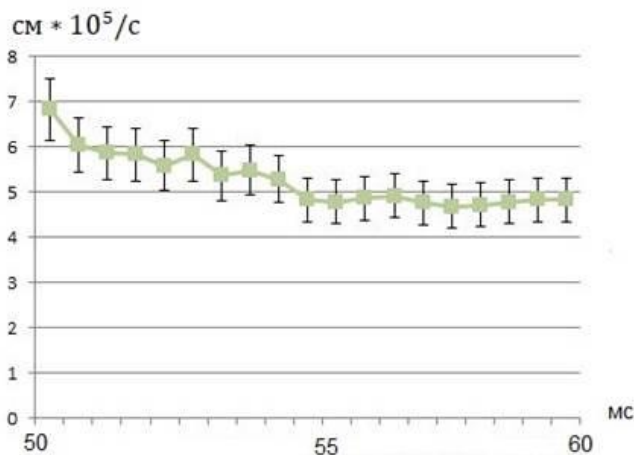


Рис. 1. График изменения полоидальной скорости вращения плазмы во время разряда №19942.

1. Буланин В.В., «Многофункциональный метод доплеровского микроволнового обратного рассеяния», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018г.;
2. Конечков Е.М. «Влияние плазмы на изучение гиротрона при электронно-циклотронном нагреве плазмы в стеллараторе Л-2М», ИОФ РАН, 2013г.
3. Харчевский А.А. «Система доплеровской рефлектометрии для стелларатора в условиях высокой мощности ЭЦР нагрева», МИРЭА, 2017г.;
4. Chirkov A. Y., Khvesyuk V. I. Plasma physics reports, 2011, **37**.
5. Скворцова Н.Н., Горшенин А. К. и др. Математическое моделирование. 2011. **23** (4), 83-89.

**Синтез материалов
с помощью импульсного
микроволнового разряда гиротрона
в смесях порошков**

Е.М. Кончечков, Н.С. Ахмадуллина*, В.Д. Борзосеков,

Д.В. Малахов, В.Д. Степахин,

О.Н. Шишилов**, Н.Н. Скворцова

ИОФ РАН, отдел физики плазмы, лаборатория «Рамус»

**Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН*

****Московский технологический университет (МИТХТ)*

E-mail: konchekov@fpl.gpi.ru

Настоящая работа направлена на решение фундаментальной научной задачи — создание методов контролируемого синтеза новых веществ и материалов в сильно неравновесных условиях. В таких условиях возможно формирование и стабилизация метастабильных фаз, которые не могут быть получены при использовании традиционных методов синтеза. Это позволит детально изучить строение и свойства таких фаз, которые могут найти, в том числе, и практическое применение. В рамках работы изучается возможность синтеза материалов (в частности, оксидных, нитридных и оксинитридных керамических материалов) в сильно неравновесных условиях, возникающих при разряде, инициируемом сверхмощным гиротроном в смесях порошков металл-диэлектрик.

Используемые на сегодняшний день методы синтеза материалов в виде порошков и компактных изделий и полуфабрикатов — самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), карботермическое восстановление, сплавление и спекание — могут быть уже отнесены к «классическим», они хорошо отработаны, однако имеют ряд недостатков (прежде всего — необходимость создания высоких температур и давлений) и ограничений (появление примесей в образцах, проблема стабилизации фаз, формирующихся при высоких температурах). С учётом давности применения этих методов можно с уверенностью

полагать, что эти недостатки и ограничения фундаментально обусловлены и уже не будут преодолены. Высокоточные и «чистые» методы синтеза — радиочастотное магнетронное распыление, методы вакуумного напыления и т.п. — приспособлены только для формирования тонких плёнок на специфических подложках. Всё это побуждает к поиску принципиально новых методов синтеза материалов, допускающих контроль над характеристиками получаемых образцов в широких диапазонах.

Метод импульсного микроволнового разряда гиротрона отличается от вышеперечисленных методов использованием в синтезе сильнонеравновесных условий [1]. Отличительной особенностью такого способа синтеза является частичное испарение частиц, реагирующих порошков, высокая импульсная (~10 кК) температура паров и газа, повышение давления во время разряда и высокоскоростное истечение реагирующих паров, а также оригинальное конструктивное решение плазмохимического реактора. При этом за счет использования ГГц диапазона длин волн (частота гиротронов ~75 ГГц) длительное время (1 мс) поддерживается высокая степень возбуждения электронных колебательных степеней свободы атомов и молекул, участвующих в реакциях. Он не имеет аналогов в мировой практике и основан на оригинальных отечественных исследованиях разрядов, выполненных на микроволновом комплексе МИГ-2, в отделе «Физики плазмы» ИОФ РАН [2].

Отличие данного метода от «классических» позволяет рассчитывать и на преодоление ограничений и недостатков этих методов. Таким образом, исследование является актуальными и может внести весомый вклад в развитие соответствующих областей химической и физической науки.

Данные исследования находятся, фактически, на стыке двух областей современной фундаментальной и прикладной науки — неорганической химии с одной стороны и физики плазмы — с

другой. С точки зрения физики плазмы, исследование позволит определить закономерности протекания процессов при возникновении микроволнового разряда. В таких разрядах проводится анализ цепных реакций синтеза вторичных веществ, и изучается природа пылевой низкотемпературной плазмы и ансамблей частиц, как очагов кристаллизации продуктов реакций. С точки зрения неорганической химии разработка основ применения метода импульсного микроволнового разряда гиротрона позволяет получать и исследовать новые нано- и микроразмерные структуры (в частности, оксидных и нитридных керамических материалов на основе кремния и алюминия, в том числе допированных ионами редкоземельных элементов) [3]. Это расширит представления о путях формирования таких структур, создаст новые возможности для управления процессом их синтеза и позволит получать материалы, характеризующиеся высокой дисперсностью частиц и равномерностью распределения фаз.

1. *Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D. et al.* Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. 2013, **8**, 58-66.
2. *Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Kop'ev V.A. et al.* Plasma Physics Reports. 2008, **34**(4), 325-330.
3. *Akhmadullina N.S., Skvortsova N.N., Obratsova E.A. et al.* IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017, **941**, 012034.

Секция 6
ФИЗИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ
И МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ.

Разработка
высококочувствительных количественных экспресс методов
иммуноанализа сложных сред
на основе магнитных нанометок

В.А. Брагина¹, А.В. Орлов^{1,2}, С.Л. Знойко¹,
М.П. Никитин², Б.Г. Горшков¹, П.И. Никитин¹

¹*ЦЕНИ ИОФ РАН, ОСПЯ, лаборатория биофотоники*
²*Московский физико-технический институт (государственный университет), лаборатория нанобиотехнологий*
E-mail: bragina_vera@nsc.gpi.ru

В настоящее время важными и актуальными биомедицинскими задачами является разработка высококочувствительных методов количественного определения биохимических маркеров социально-значимых заболеваний (белков, гормонов, антител), различных патогенных микроорганизмов и токсинов в сложных средах (кровь, сыворотка, слюна, продукты питания и др.).

Для увеличения чувствительности и количественного измерения низких концентраций биологически активных веществ перспективным представляется использование магнитных частиц (МЧ) в качестве нанометок биохимических реакций [1].

Целью нашего исследования являлась разработка различных биосенсорных методов на основе МЧ для высококочувствительного, быстрого и количественного анализа сред сложного состава.

Для регистрации МЧ разработано семейство экспериментальных устройств, основанных на нелинейном намагничивании частиц переменным магнитным полем на двух частотах и регистрации отклика на комбинаторных частотах. Созданные регистраторы имеют рекордные пределы обнаружения 0.4 нг МЧ в объеме 0.2 мл [1] или 39 пг магнитных наноструктур с

вихревым состоянием намагниченности [2] и чрезвычайно широкий линейный динамический диапазон 7 порядков.

На основе созданных электронных регистраторов разработаны различные типы магнитных биосенсоров. В частности, за счет применения в качестве твердой фазы волоконных 3D структур с развитой иммуноактивной поверхностью и быстрой иммунофильтрацией антигенов удалось улучшить на 2-3 порядка пороги чувствительности и значительно сократить время анализа по сравнению с иммуноферментным анализом (ИФА). Пороги детекции ряда стафилококковых токсинов в цельном молоке составили 4-10 пг/мл, что в ≈ 50 раз лучше, чем у стандартных ИФА. При этом зависимость сигналов имеет линейный характер при изменении концентрации аналита на 3 порядка, что обеспечивает высокую точность измерений.

На основе иммунохроматографических тест-полосок и “сухих” реагентов разработана биосенсорная платформа, сочетающая быстроту и простоту проведения анализа белковых маркеров заболеваний в плазме крови на уровне концентраций 25 пг/мл [1].

Разработан метод экспрессного определения маркеров заболеваний щитовидной железы (на примере детекции тиреотропного гормона – ТТГ), сочетающего в себе преимущества быстрых и простых иммунохроматографических методов с высокой чувствительностью, не хуже, чем у лучших трудоемких лабораторных методов. В частности, разработан биосенсорный метод определения ТТГ в клинических образцах сыворотки крови с пределом детекции 0.02 мМЕ/л и линейным диапазоном более 3 порядков. Это обеспечивает покрытие всего возможного диапазона колебаний концентраций гормона в сыворотке крови человека.

Разработан быстрый и рекордно-чувствительный метод измерения ультранизких концентраций малых молекул (гаптенов). Метод продемонстрировал на примере измерений концентраций гормона щитовидной железы тироксина (Т4) в сыворотке крови.

Достигнуты предел детекции – 16 фг/мл и динамический диапазон - 3 порядка при времени анализа менее 30 мин [3]. Для выбора оптимальных иммунореагентов использовались оригинальные методы на основе спектрально-корреляционной интерферометрии, позволяющие в режиме реального регистрировать кинетику взаимодействия биомолекул и функционализированных наночастиц.

Разработано четыре типа многоканальных регистраторов магнитных нанометок для мультиплексного анализа и одновременного обнаружения нескольких аналитов в сложных средах. Устройства протестированы для измерения концентраций ряда маркеров кардио- и онкозаболеваний, малых молекул и олигонуклеотидов [4]. В частности, продемонстрирована регистрации маркера инфаркта миокарда - кардиального тропонина I в плазме крови человека на уровне от 12 пг/мл и динамическом диапазоне 3 порядка. Достигнутый уровень соответствует критерию “99 перцентиля” - обнаружению ультранизких фоновых концентраций тропонина у 99% здорового населения.

Разработанные биосенсорные методы могут использоваться для детекции биохимических маркеров социально-значимых заболеваний в сложных биологических жидкостях, разработки нового поколения «умных» наноматериалов для тераностики [5], а также перспективны для *in vitro* диагностики, контроля качества продуктов питания, экологического мониторинга и др.

- 1.Orlov A.V., Bragina V.A., Nikitin M.P., Nikitin P.I. Biosens. Bioelectron. 2016, **79**, 423-429.
- 2.Nikitin M.P., Orlov A.V., Sokolov I.L. et al. Nanoscale. 2018, **10**, 11642-11650.
- 3.Znoyko S.L., Orlov A.V., Pushkarev A.V. et al. Anal. Chim. Acta. 2018, **1034**, 161-167.
- 4.Nikitin M.P., Orlov A.V., Znoyko S.L. et al. J. Magn. Magn. Mat. 2018, **459**, 260-264.
- 5.Tregubov A.A., Nikitin P.I. and Nikitin M.P. Chem. Rev. 2018. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00198.

Лазерная плазма в масс-спектрометрическом анализе органических объектов

А.Б. Бухарина¹, А.В. Пенто¹, Р.С. Аблизен¹,

А.А. Гречников², С.М. Никифоров¹

¹ИОФ РАН, отдел колебаний, лаборатория лазерной диагностики

²Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

E-mail: Ay15@mail.ru

В настоящее время одним из важных направлений развития лазерной масс-спектрометрии является разработка методов анализа веществ и материалов при атмосферном давлении без пробоподготовки. Такие методы чрезвычайно актуальны в биологии и медицине для анализа состава и диагностики патологий в биологических образцах, в системах обеспечения безопасности для определения в реальном времени присутствия наркотических и взрывчатых веществ, в фармакологии для идентификации лекарств.

Доклад посвящен развитию разработанного ранее метод масс-спектрометрического анализа с ионизацией органических молекул излучением лазерной плазмы [1] при атмосферном давлении. В этом методе перевод исследуемого объекта в газовую фазу осуществляется посредством лазерной абляции. Полученные продукты затем ионизируются излучением лазерной плазмы и анализируются времяпролетным масс-спектрометром.

С применением методов многомерной статистики для анализа масс-спектров была показана возможность выделения патологических участков биологической ткани.

Проведено численное моделирование транспорта ионов в среде плотного газа из области ионизации в масс-анализатор через газодинамический интерфейс ввода. Найдены оптимальные условия транспортировки ионов в масс-анализатор. Результаты моделирования находятся в согласии с экспериментом.

1. Пенто А.В., Никифоров С.М., Симановский Я.О., Гречников А.А., Алимтеев С.С. Квантовая электроника. 2013, **43**(1), 55–59.

Разработка
метода автоматизированной перкуссионной диагностики
М.В. Веремьева

*ИОФ РАН, отдел экологических и медицинских проблем,
лаборатория физики живых систем
E-mail: mar33567736@yandex.ru*

Перкуссионная диагностика заключается в постукивании по поверхности грудной клетки и брюшной полости и анализе звуковых явлений, возникающих при этом. Характеристики перкуссионного звука зависят от механических свойств изучаемой области, которые отличаются у разных органов, а также у патологической и здоровой ткани. На данный момент в медицине сформировалась общепринятая классификация перкуссионных звуков, однако поиск объективных критериев для оценивания различий этих типов звуков продолжается до сих пор.

Целью работы является получение записей перкуссионных звуков и их последующий анализ, нахождение общих закономерностей и количественных параметров, по которым можно было бы описать и сравнить звуки. Задача работы заключается в создании биотехнической системы для регистрации и обработки перкуссионных звуков.

В рамках работы был спроектирован и создан макет микрофонного канала биотехнической системы, который включает стетоскопический датчик (микрофон и стетоскопическая насадка), блоки аналоговой и цифровой фильтрации, программное обеспечение для автоматической записи и выведения сигналаграммы на экран в режиме реального времени. Также был создан скрипт для получения усреднённого вида сигналаграммы одного постукивания.

Макет был протестирован на одном здоровом добровольце женского пола в возрасте 24 лет, с ростом 161 см, с весом 50 кг. Точка расположения центра датчика была на расстоянии 5,7 см вниз по вертикали и 2,9 см по горизонтали вправо от грудинного конца

правой ключицы; точка нанесения перкуссионных постукиваний была на расстоянии 3,3 см вниз по вертикали и 6 см по горизонтали вправо от грудинного конца правой ключицы. Перкуссионные постукивания создавались вручную. Запись звуков длилась 12 секунд. Совершалось по 10 постукиваний в каждой записи.

Были получены сигналограммы и спектры перкуссионных звуков, образующихся в лёгочной паренхиме. Сравнивались записи, полученные на разных этапах обработки сигнала:

- до аналоговой фильтрации (для микрофона со стетоскопической насадкой и без насадки);
- до цифровой фильтрации;
- после цифровой фильтрации.

Результаты сравнения записей подтвердили выполнение заданных требований к каналу, а именно:

- получение коэффициента усиления амплитуды аналогового сигнала $K_u \approx 2$ (величина коэффициента подбиралась таким образом, чтобы максимальная амплитуда напряжения сигнала была соизмерима с входным напряжением аналогово-цифрового преобразователя, но при этом не превышала напряжение питания);
- ослабление спектральных составляющих аналогового сигнала как минимум на 6-8 дБ за пределами интервала 3-1600 Гц;
- ослабление как минимум на 40 дБ спектральных составляющих цифрового сигнала, лежащих ниже 51 Гц, в том числе подавление сетевой помехи на частоте 50 Гц.

Визуально полученные записи соответствуют типу перкуссионного сигнала, возникающего в лёгочной ткани без патологий.

В дальнейшем планируется доработка макета и проведение экспериментальных исследований для набора данных и их последующего анализа.

Работа поддержана грантом РФФИ 15-01-06246.

Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю А.И. Дьяченко.

**Применение
низкотемпературной плазмы в
медико-биологических исследованиях**

Е.М. Кончечков, Л.В. Колик, К.В. Артемьев,

Д.В. Малахов, В.Д. Степахин

ИОФ РАН, отдел физики плазмы, лаборатория «Рамус»

E-mail: konchekov@fpl.gpi.ru

Активное развитие компактных устройств создания низкотемпературной (холодной) плазмы газового разряда при атмосферном давлении в последние годы привело к расширению области использования плазменных технологий. В настоящее время к наиболее важным и перспективным областям исследований использования холодной плазмы можно отнести экологию, медицину, ветеринарию и сельское хозяйство. [1-3] Для биомедицинских приложений основными источниками генерации холодной плазмы атмосферного давления служат различные формы тлеющего разряда атмосферного давления: ВЧ-микроразряды, барьерные разряды и коронные разряды. [4]

Применению холодной плазмы в медицине и ветеринарии способствовали зарубежные и отечественные исследования, в которых показано, что холодная плазма является очень эффективным антимикробным агентом. Отмечается, что плазменное воздействие эффективно убивает кишечную и синегнойную палочки, золотистый стафилококк, патогенные грибы, вирусы и других представителей вредоносной микрофлоры. В ветеринарной медицине она используется при обработке повреждений кожи и подлежащих мягких тканей, а также в хирургии паренхиматозных органов. Причем, так как температура такой плазмы не превышает 40 градусов, возможно не только обрабатывать, обеззараживать медицинские изделия, но и работать непосредственно с живой тканью.

В этой связи особый интерес представляют исследования, связанные с применением низкотемпературной плазмы

атмосферного давления в качестве инструмента многофакторного воздействия на бактериальную среду, культуры микроорганизмов, а также для стерилизации и обеззараживания различных объектов.

В настоящей работе низкотемпературная плазма атмосферного давления создается прототипами источников, разработанными авторами и позволяющими в достаточно широких пределах менять параметры холодной плазмы как при прямом воздействии на объекты исследования, так и с использованием плазменных струй. В первом случае используется диэлектрический барьерный разряд в плавающем потенциале. Изменение параметров воздействующей плазмы возможно с помощью вариации мощности источника и длительности воздействия, изменением конфигурации рабочей части, обрабатываемой площади. Во втором случае возможно изменение состава рабочего газа, его скорости протока. В рамках работы проводятся как физические эксперименты, так и медико-биологические исследования, которые позволят определить оптимальные режимы работы источников плазмы для повышения эффективности их воздействия.

На данном этапе авторами проведены предварительные исследования: показано наличие эффекта от обработки холодной плазмой образцов воды, измерены спектры свечения разряда и проведена оценка температуры плазмы. Последующие эксперименты будут направлены на оценку бактерицидного эффекта низкотемпературной плазмы, создаваемой разработанными источниками, *in vitro* на культурах *E.coli*, *st.aureus* и *ps.aeruginosa*, исследование бактерицидного действия холодной плазмы на культуры микроорганизмов в воде (оценку способности холодной плазмы к стерилизации жидкости), а также исследование регенераторного действия холодной плазмы на биологических моделях ран и ожогов.

1. *Adamovich I. et al.* Journal of Physics D: Applied Physics. 2017, **50(32)**, 323001.

2. *Misra N.N., Schlüter O., Cullen P.J.* Cold Plasma in Food and Agriculture. Academic Press. 2016.
3. *Емельянов О.А., Петрова Н.О., Смирнова Н.В., Шемет М.В.* Письма в ЖТФ. 2017, **43**(16), 30-37
4. *Fridman G., Friedman G., Gutsol A. et al.* Plasma Process. and Polym. 2008, **5**(6), 503–533.

**Легированные редкоземельными ионами
кристаллические наночастицы для биофотоники**

Д.В. Поминова, В.Ю. Пройдакова, И.Д. Романишкин,

Ю.А. Ермакова, Д.С. Ясыркина, А.С. Ванецев,

С.В. Кузнецов, А.В. Рябова

ЦЕНИ ИОФ РАН, ОСПЯ, Лаборатория лазерной биоспектроскопии

E-mail: pominovadv@gmail.com

Биофотоника изучает взаимодействие электромагнитного излучения светового или близкого к нему диапазонов с различными биологическими объектами. При этом выделяют два основных направления: использование света для получения информации о состоянии биообъекта и использование света в качестве инструмента воздействия на биообъекты. На сегодняшний день наблюдается тенденция к объединению этих направлений. Исследователи стремятся использовать один тип биомаркеров как для визуализации биообъектов и получения информации о них, так и для целевого воздействия на отдельные типы биообъектов при необходимости.

Для решения этой задачи ключевое значение имеет поиск новых материалов. Перспективным материалом для создания биометок являются ап-конверсионные наночастицы, представляющие собой неорганическую матрицу, легированную редкоземельными ионами. Ключевым свойством ап-конверсионных наночастиц является способность преобразовывать возбуждающее инфракрасное излучение в люминесценцию в видимой части спектра. Возбуждение в ближнем инфракрасном диапазоне спектра глубоко проникает в биоткани, не вызывает появления паразитной люминесценции и не воздействует на биохимические процессы. Большой сдвиг по длинам волн между полосами возбуждения и ап-конверсионной люминесценции и высокая фотостабильность дают возможность отслеживания одиночных частиц и длительного наблюдения за процессами *in vitro* и *in vivo*. Важно отметить высокую эффективность ап-конверсионных частиц при

двухфотонном возбуждении, длительное время жизни люминесценции и отсутствие токсичности. Разнообразие матриц и легирующих ионов для синтеза ап-конверсионных наночастиц позволяет получать составы с различными комбинациями ионов лантаноидов, в том числе возможно введение в состав ионов гадолиния, являющегося основным контрастирующим агентом для магниторезонансной томографии.

Варьируя мощность и длительность импульса возбуждающего оптического излучения, можно проводить не только диагностику, но и фототермальную терапию, индуцируя нагрев ап-конверсионных наночастиц. При этом, используя чувствительность некоторых 4f переходов редкоземельных ионов к температуре, можно оценивать температуру нагрева по изменению отношения интенсивностей полос ап-конверсионной люминесценции. Для проведения терапии с помощью ап-конверсионных наночастиц, можно также привязать к их поверхности молекулы фототоксичного вещества фотосенсибилизатора. Ранее нами также было показана чувствительность времени жизни ап-конверсионной люминесценции к pH окружающей среды.

Целью работ по данной тематике является создание мультифункциональных биосенсоров, обладающих интенсивной люминесценцией, магнитными свойствами, способностью к нагреву под действием лазерного излучения, а также фототоксичными свойствами при покрытии фотосенсибилизаторами. Фундаментальной научной проблемой является неинвазивное определение температуры и pH ближайшего окружения наночастиц, находящихся в клетках и органеллах биотканей, методами лазерной спектроскопии с учетом рассеивающих и поглощающих свойств биотканей, а также контроль локальности и интенсивности нагрева за счет импульсно-периодических режимов возбуждения.

Синтез ап-конверсионных частиц, исследованных в работе, проводили в НЦЛМТ ИОФ РАН тремя различными методами:

осаждением из водных растворов, гидротермальным микроволновым методом и безводным методом в олеиновой кислоте.

В рамках работ была установлена зависимость эффективности ап-конверсионного преобразования от концентрации допантов Yb^{3+} , Er^{3+} для различных фторидных и оксидных матриц, определены наиболее перспективные составы. Проведены работы по покрытию наночастиц фталоцианином алюминия и продемонстрирована генерация синглетного кислорода при возбуждении длиной волны 980 нм. Показано, что варьируя длительность импульса возбуждающего излучения можно варьировать относительную температуру нагрева наночастиц от 1 до 40°C, что позволяет варьировать интенсивность воздействия при проведении гипертермии. Было показано, что наряду с изменением температуры нагрева при импульсном возбуждении ап-конверсионной люминесценции, наблюдается изменение отношения интенсивностей люминесценции в зеленой и красной частях спектра. С помощью теоретического моделирования было показано, что при импульсах короче 1.5 мс наблюдается снижение интенсивности зеленой люминесценции, так как не успевают заселиться состояния ${}^2\text{H}_{11/2}$, ${}^4\text{S}_{3/2}$ при излучательных переходах с которых происходит люминесценция в зеленой части спектра. Так как люминесценция в зеленой части спектра используется для термометрии, следует избегать использования импульсов короче 1.5 мс, чтобы обеспечить достаточно интенсивный люминесцентный сигнал для эффективной термометрии. Проведены предварительные исследования гипертермии со спектроскопическим контролем температуры на клеточных культурах *in vitro*. Продемонстрировано, что используя частицы, легированные ионами Yb-Er, можно оценивать локальную температуру нагрева клеток в интервале температур 30-60°C с высокой точностью, чувствительность составила $1.34\% \times \text{C}^{-1}$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-72-20186)

Оценка степени приживления или отторжения кожных трансплантатов спектроскопическими методами с использованием флуоресцентных наночастиц различных фотосенсибилизаторов

Д.С. Фаррахова, В.И. Макаров, В.Б. Лощенов

ЦЕНИ ИОФ РАН, ОСПЯ, лаборатория лазерной биоспектроскопии

E-mail: farrakhova.dina@mail.ru

Цель данной работы заключается в разработке методики для оценки степени воспаления кожных трансплантатов и предупреждения их отторжения с использованием фотосенсибилизаторов (ФС) и нанофотосенсибилизаторов (наноФС). Для достижения этой цели была разработана методика получения коллоидного раствора наночастиц фталоцианина алюминия (nAlPc) с размерами 93.1 ± 49.8 нм и получения нормировочной кривой для определения концентраций коллоидных растворов nAlPc. Коллоидный раствор nAlPc не флуоресцирует, что объясняется тушением флуоресценции внутри молекулярной кристаллической структуры nAlPc [1]. Но попадая в воспаленную биологическую ткань, молекулы AlPc приобретают флуоресцентные свойства. Это связано с наличием в воспаленной биоткани большого количества макрофагов и патогенной микрофлоры, взаимодействуя с которыми у nAlPc возникает флуоресценция [2].

Проведение ФДТ способствует уменьшению степени воспаления (за счет элиминации излишне активных иммунных клеток) в области трансплантатов и получению количественной оценки концентрации гемоглобина в оксигенированной и редуцированной форме до и после ФДТ.

Оценка динамики изменений флуоресцентных свойств nAlPc при приживлении кожных тканей была проведена путем анализа спектров флуоресценции, полученных при помощи спектроскопической системы. Для возбуждения флуоресценции использовались длины волн 405 нм и 633 нм полупроводникового лазера.

Визуализация неоангиогенеза кровеносной и лимфотической системы в кожных трансплантатах проводилась при помощи индоцианина зеленого (ICG), хлорина е6 (Ce6), метиленового синего (MB), фталоцианина алюминия (AlPc) и измерительной

видеосистемы. Для исследования кинетики фотолюминесценции наноФС был разработан измерительный комплекс, основанный на стрик-камере Hamamatsu C10627-13, с временным разрешением 15 пс, сопряжённой с волоконно-оптическим спектрометром. Для возбуждения использовался полупроводниковый лазер Hamamatsu с длительностью импульса 100 пс и длиной волны 637 нм.

После перекрестной трансплантации кожи на спине мыши, интенсивность флуоресценции, соответствующей флуоресценции nAIPc возрастала, что свидетельствует об усилении воспалительной реакции. Вдобавок был проведен анализ спектров флуоресценции с длиной волны возбуждения 405 нм. На спектрограммах отчетливый пик на 682 нм, который соответствует флуоресценции nAIPc и пик копропорфиринов наблюдается при 631 нм. Флуоресценция, наблюдающаяся в спектре в диапазоне 480-600 нм соответствует эндогенным порфиринам и флуорофорам. Также наблюдается отсутствие пика флуоресценции nAIPc на 16 день после перекрестной трансплантации. Этот факт может говорить о значительном снижении концентрации иммунных клеток в трансплантате. Но при этом на 16 день отмечается высокая интенсивность флуоресценции эндогенных флуорофоров по сравнению с нормальной кожей, что говорит об изменении состава кожного покрова во время формирования рубцовой ткани. В ходе эксперимента была проведена ФДТ на 18 день после перекрестной трансплантации с целью повышения скорости приживления кожного трансплантата и фотобличинга nAIPc. При сравнении спектральных контуров заметно наличие фталоцианинового пика в приживляемом трансплантате. После проведения ФДТ фталоцианиновый пик исчезает, что соответствует фотобличингу nAIPc.

Также, в данной работе была получена динамика изменения интенсивности флуоресценции nAIPc под тонким и толстым трансплантатами. В ходе эксперимента было зафиксировано две компоненты времени жизни флуоресценции nAIPc под обоими трансплантатами. Времена жизни флуоресценции nAIPc сами по себе меняются незначительно, но вклад каждой из компонент в общую флуоресценцию существенно изменяется. А именно, вклад короткой компоненты существенно увеличивается и к концу эксперимента достигает 1.5:1, в то время как впервые дни после трансплантации этот вклад составлял 13:1.

Анализ флуоресцентных изображений при введении люминофоров таких как ICG, Ce6, MB и AIPc позволяет количественно определить степень прорастания новых сосудов в приживляемую ткань как кровеносной, так и лимфатической системы при трансплантации кожи мелких лабораторных животных. Спустя неделю после перекрестной трансплантации кожи видно отсутствие флуоресценции экзогенных флуорофоров в трансплантатах кожи и мышцы, что говорит о недостаточном прорастании сосудистой сети в приживляемую ткань. Но через 2 месяца контраст между здоровой кожей и трансплантатами не виден, что свидетельствует об образовании новой сосудистой сети. Подкожное введение люминофоров позволяет оценить динамику неоангиогенеза лимфатической системы внутри ткани трансплантатов.

В данной работе было показано, что местная аппликация nAIPc под трансплантат кожи показала, что интенсивность воспалительных реакций в тканях коррелирует с интенсивностью флуоресценции nAIPc. Дальнейшее проведение ФДТ может позволить контролировать степень приживания трансплантатов. Анализ флуоресцентных изображений при введении люминофоров ICG, Ce6, MB и AIPc позволяет количественно определить степень прорастания новых сосудов в приживляемую ткань как кровеносной, так и лимфатической системы.

1. *Steiner R., Brey Mayer J., Ruck A., et al.* Crystalline organic nanoparticles for diagnosis and PDT, *Optical Methods for Tumor Treatment and Detection: Mechanisms and Techniques in Photodynamic Therapy XXIV*, 9308, 2015, 93080R.
2. *Vasilchenko S.Y., Volkova A.I., Ryabova A.V. et al.* *Journal of Biophotonics*. **3** (5-6). 2010, 336-346.

Приложения

терагерцовой высокоразрешающей микроскопии, основанной на эффекте твердотельной иммерсии, для визуализации биологических объектов

Н.В. Черномырдин^{1,2,3*}, А.С. Кучерявенко^{1,2}, Г.М. Катыба^{1,2,4},
Г.А. Командин¹, И.В. Решетов³, В.В. Тучин⁵ и К.И. Зайцев^{1,2,3}

¹*ИОФ РАН, отдел субмиллиметровой спектроскопии,*

лаборатория субмиллиметровой диэлектрической спектроскопии

²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

³*Первый Московский государственный медицинский университет
им. И.М. Сеченова*

⁴*Институт физики твердого тела РАН,*

⁵*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

*E-mail: chernik-a@yandex.ru

Методы ТГц спектроскопии и визуализации нашли множество приложений в биологии и медицине [1], в том числе, в диагностике злокачественных новообразований различной локализации: кожи [2–4], молочной железы [5], кишечника [6], головного мозга [7] и др. Низкое пространственное разрешение ТГц спектроскопических и изображающих систем, связанное с большой длиной волны ТГц излучения, ограничивает применение методов ТГц диагностики в клинической практике [8]. Разработка новых методов ТГц спектроскопии и визуализации тканей с суб-волновым пространственным разрешением является актуальной проблемой современной прикладной физики.

Ряд предложенных ранее методов ТГц визуализации с суб-волновым пространственным разрешением, например, цифровая голография, имиджинг с синтезом апертуры, ближнепольная сканирующая зондовая микроскопия, предполагают использование мощных источников и чувствительных детекторов ТГц излучения, что значительно ограничивает возможности практического использования перечисленных методов в клинической практике. Перспективным путем визуализации биологических тканей с суб-

волновым пространственным разрешением является метод микроскопии на основе эффекта твердотельной иммерсии [9]. Эффект твердотельной иммерсии позволяет существенно уменьшить размер каустики пучка электромагнитного излучения за счет его фокусировки в свободном пространстве, на небольшом расстоянии ($< \lambda$) позади среды с высоким показателем преломления [10]. Микроскопия на основе эффекта твердотельной иммерсии широко используется в видимой и инфракрасной областях шкалы электромагнитных волн; однако он до последнего времени не применялся в ТГц диапазоне, а также не был адаптирован для визуализации биологических тканей.

В настоящей работе предложен метод ТГц микроскопии на основе эффекта твердотельной иммерсии с пространственным разрешением 0.15λ , где λ – длина волны электромагнитного излучения в свободном пространстве. Предложен подход к фиксации биологических тканей в фокальной плоскости оптической системы микроскопа, реализующей принцип твердотельной иммерсии и состоящей из трех элементов [11–13]: (i) полимерной широкоапертурной асферической линзы [11]; (ii) усеченной полусферы из высокорезистивного кремния (HRFZ-Si), расположенной перед плоскостью объекта, концентрично сходящемуся ТГц пучку; (iii) плоского опорного окна, изготовленного из HRFZ-Si и расположенного вплотную к плоской грани усеченной сферы. Биологические объекты размещаются на верхней грани кремниевого окна, а регистрация изображения объекта выполняется за счет сканирования его поверхности пучком сфокусированного ТГц излучения [11–13].

Проведено численное моделирование фокусировки пучка ТГц излучения с помощью конечно-разностного метода численного решения уравнений Максвелла, что позволило оценить достижимое пространственное разрешение и глубину резкости оптической системы. Создан макет ТГц микроскопа на основе эффекта

твердотельной иммерсии, использующий лампу обратной волны ($\lambda = 500$ мкм) и ячейку Голея в качестве источника и детектора непрерывного ТГц излучения, соответственно. Проведена экспериментальная апробация макета; продемонстрировано его высокое пространственное разрешение $0,15\lambda$. Зарегистрированы ТГц изображения различных биологических объектов: листовых пластин растений [12], клеточных сфероидов [13] и образцов тканей человека *ex vivo* в нормальном состоянии и при наличии патологии [14]. Показана перспективность предложенного метода ТГц визуализации с суб-волновым разрешением в различных областях биологии и медицины.

1. *Smolyanskaya O.A. et al.* Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of tissues and bioliquids related to water content // *Prog. Quantum Electron.* 2018 accepted.
2. *Wallace V.P. et al.* *Br. J. Dermatol.* 2004, **151**(2), 424–432.
3. *Zaytsev K.I. et al.* *Appl. Phys. Lett.* 2015, **106**(5), 053702.
4. *Zaytsev K.I. et al.* *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2015, **5**(5), 817–827.
5. *Fitzgerald A.J. et al.* *Radiology.* 2006, **239**(2) 533–540.
6. *Doradla P. et al.* *J. Biomed. Opt.* 2013, **18**(9), 90504.
7. *Oh S.J. et al.* *Biomed. Opt. Express.* 2014, **5**(8), 2837.
8. *Lee Y.-S.* *Principles of Terahertz Science and Technology.* New York, NY, USA: Springer, 2009, 347 p.
9. *Mansfield S.M., Kino G.S.* *Appl. Phys. Lett.* 1990, **57**(24), 2615–2616.
10. *Chernomyrdin N.V. et al.* *Appl. Phys. Lett.* 2017, **110**(22), 221109.
11. *Chernomyrdin N.V. et al.* *Rev. Sci. Instrum.* 2017, **88**(1), 014703.
12. *Chernomyrdin N.V. et al.* *Proc. SPIE* 2018, 10716, 1071606.
13. *Chernomyrdin N.V. et al.* *Proc. SPIE* 2018, 10677, 106771Y.
14. *Chernomyrdin N.V. et al.* *Appl. Phys. Lett.* 2018, **113**(11), 111102.

Секция 7
РАДИОФИЗИКА И АКУСТИКА

**Аппаратно-программный комплекс диагностики
доплеровской рефлектометрии в стеллараторе.**

Д.А. Балабанов, А.А. Харчевский, Н.Н. Скворцова
ИОФ РАН, отдел физики плазмы, лаборатория РАМУС
E-mail: balabanovda@gmail.com

Целью настоящей работы является разработка аппаратно-программного комплекса установки доплеровского рефлектометра на стеллараторе Л-2М, а также получение сигналов диагностики и их первичная обработка.

Диагностика установлена на установке магнитного удержания плазмы стеллараторе Л-2М [1]. Метод данной диагностики основан на полном отражении электромагнитных волн от плазмы при определенной плотности и частоте (эффект отсечки). При отражении электромагнитной волны от плазмы возникает эффект Допплера – изменение частоты принимаемых волн по сравнению с излучаемыми при относительном движении источника радиоволн и облучаемого физического объекта.

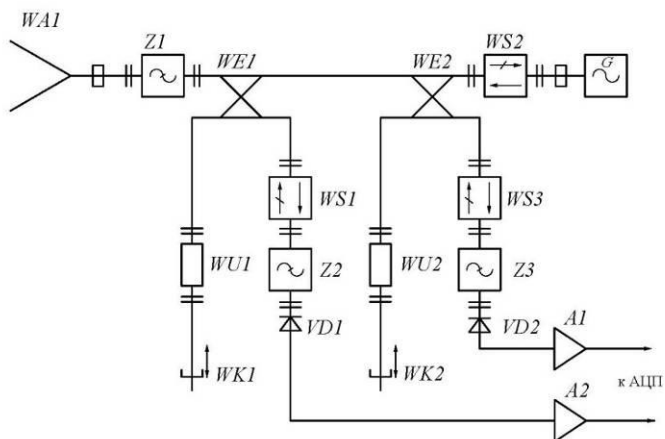


Рис. 1 Принципиальная схема доплеровского рефлектометра, установленного на стеллараторе Л-2М

В результате данной работы разработан и настроен аппаратно-программный комплекс доплеровского рефлектометра стелларатора Л-2М, проведены измерения с нагревом плазмы с одним гиротроном с мощностью от 150 до 250 кВт, построены эволюции Фурье-спектров с временным окном 0.5мс, в течении импульса гиротрона и при распаде плазмы [2].

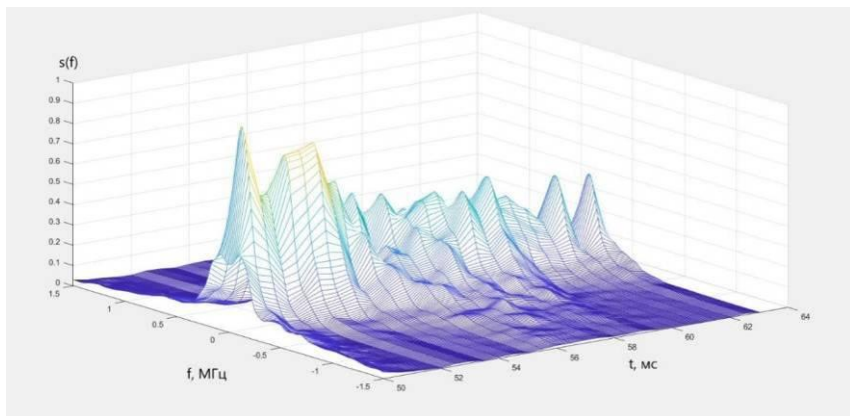


Рис. 2 –Трехмерное изображение Фурье спектра для 21749

При работе над магистерской диссертацией будут добавлены дополнительные радиофизические методы анализа данных [3] – корреляционные, Вейвлет, и др.

6. *Харчевский А.А.* «Система доплеровской рефлектометрии для стелларатора в условиях высокой мощности ЭЦР нагрева», МИРЭА, 2017г.
7. *Пшеничников А.А., Колик Л.В., Малых Н.И., и др.* ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. 2005.7, 604-611.
8. *Шахтарин Б.И.* Методы спектрального оценивания случайных процессов / Б.И. Шахтарин, В.А. Ковригин. М.: Гелиос АРВ, 2005 г. – С. 248.

Описание электрических свойств воды и льда в рамках ион-молекулярной модели

А.А. Васин, А.А. Волков

ИОФ РАН, отдел субмиллиметровой спектроскопии

E-mail: alexcampeones@yandex.ru

В любых процессах с участием воды и льда важную роль играют их электрические свойства. В развертке по частоте они составляют электродинамический отклик. У воды и льда электродинамические отклики специфичны, но качественно схожи: одинаково высокая *протонная* проводимость на постоянном токе, одинаковый температурный ход статической диэлектрической проницаемости, схожая форма спектров диэлектрических и инфракрасных потерь.

Близость электродинамических свойств воды и льда иллюстрируется рисунками 1 и 2. На рисунке 1 точки воды и льда лежат на, практически, одной гиперболической кривой. На рисунке 2 статическое значение диэлектрической проницаемости $\epsilon(0) \sim 80-100$ формируется из одинаковых пиков поглощения, раздвинутых на 6 порядков по частоте. На частотах ниже 1 кГц диэлектрические проницаемости воды и льда, $\epsilon(0)$, практически, одинаковые.

Штриховой линией на рисунке 2 отмечена рабочая частота бытовых СВЧ-печей ($\nu = 2.45$ ГГц). Нагрев воды обуславливается высоким значением $\epsilon''(\nu)$. Выделяется тепло $Q \sim \nu \epsilon''(\nu)$. У льда в этой области поглощение ничтожно мало, поглощение отсутствует.

Представленная панорама на атомно-молекулярном уровне объяснения не имеет. Отдельных моделей много, но в большинстве они противоречивы, и выводы в общую картину не складываются. По мере привлечения всё новых экспериментальных и расчётных методов противоречия с годами не снимаются, а накапливаются. Сегодня вода известна не столько своими свойствами, сколько их аномалиями [1].

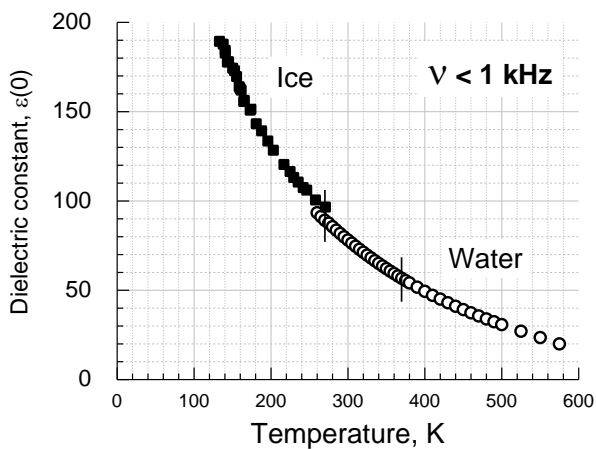


Рис.1. Температурная зависимость статической диэлектрической проницаемости $\epsilon(0)$ жидкой воды и льда [4,5]. Точки при 273 К, где $\epsilon(0) \sim 90$, соответствуют точкам на вертикальной оси Рис. 2.

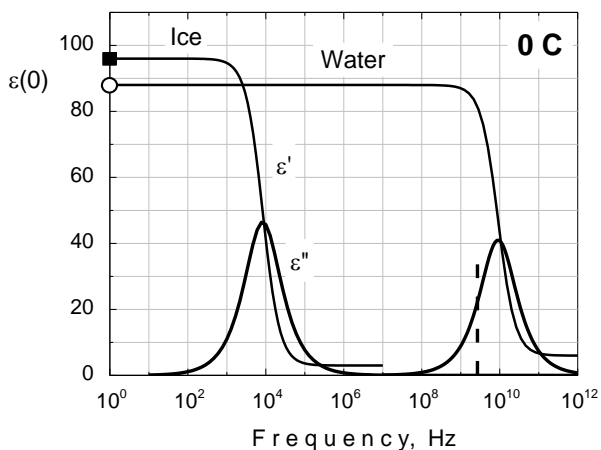


Рис. 2. Частотные зависимости действительной $\epsilon'(\nu)$ и мнимой $\epsilon''(\nu)$ частей диэлектрической проницаемости жидкой воды и льда для температуры 0°C [4,6]. Точки на вертикальной оси $\epsilon(0) \sim 90$ соответствуют точкам при 273 К на Рис. 1.

В отделе субмиллиметровой спектроскопии ИОФАН на основе многолетних спектральных исследований высказана гипотеза, что поляризация в воде и льду проходит по одному и тому же сценарию:

создается не переориентациями молекул H_2O , как считается, а биполярной диффузией ионов, которые на короткие времена из этих молекул образуются [2]. Движущим механизмом процесса предполагается тепловое движение молекул, соударения и обмен протонами. Принципиальным является взаимопревращение ионов и молекул. В результате него в воде и во льду в динамическом режиме поддерживается высокая концентрация *трансляционно* подвижных зарядов.

В рамках гипотезы нами сконструирована среда (молекулярная модель), электродинамика которой отвечает изображённым на Рис. 1 и 2 графикам [2,3]. Модельные вода и лёд между собой отличаются исключительно скоростью протекания процесса диффузии. От существующих модель отличается отсутствием сетки водородных связей. Скрепляющим фактором является кулоновское поле подвижных зарядов.

В настоящем докладе обсуждаются принципы построения модели и перспективы развития для описания транспортных свойства воды и льда – диффузии, вязкости, теплопроводности.

1. *D. Robson and M. Marshall. The many mysteries of water, New Scientist. 2018.*
2. *A.A. Volkov, V.G. Artemov, A.A. Volkov and N.N. Sysoev. J. Mol. Liq. 2017. 248, 564–568.*
3. *A.A. Volkov, A.A. Vasin, A.A. Volkov, Jr.. Ferroelectrics. 2018. in press.*
4. *G.P. Johari and E. Whalley. J. Chem. Phys. 1981. 75, 1333.*
5. *D.P. Fernández, et. al. J. Phys. Chem. Ref. Data. 1997. 26, 1125.*
6. *W.J. Ellison. J. Phys. Chem. Ref. Data. 2007. 36,1.*

**Измерение малых значений
коэффициента межфазного натяжения
с помощью возбуждения капиллярных волн
импульсом радиационного давления ультразвука
в условиях микрогравитации**

Л.М. Крутянский^{1,3}, А.П. Брысев^{1,3}, F. Zoueshtiagh^{2,3},
P. Pernod^{2,3}, Д.И. Макалкин^{1,3}

¹*ИЦВИ ИОФ РАН, лаборатория ультразвуки*

²*University of Lille, CNRS, UMR 8520, Institut d'Electronique,
Microélectronique et Nanotechnologie (IEMN), Groupe AIMAN-FILMS /
Centrale Lille – CS20048 - Laboratoire International LIA LEMAC-LICS*

³*Международная ассоциированная лаборатория критических и
сверхкритических явлений в функциональной электронике, акустике
и флюидике*

E-mail: dmitymakalkin@yandex.ru

В работе предложен и экспериментально апробирован в условиях микрогравитации метод быстрого определения с достаточно высокой точностью малых значений коэффициента межфазного натяжения (КМН) в бинарных жидкостях. Особенность метода состоит в широкополосном возбуждении бегущих капиллярных волн коротким ультразвуковым импульсом, благодаря чему все необходимые для определения КМН данные регистрируются за одну экспериментальную реализацию [1].

Расчет величины КМН σ основан на дисперсионном соотношении для гравитационно-капиллярных волн на границе жидкостей [2]:

$$\omega^2 = \frac{(\rho_1 - \rho_2)g}{\rho_1 + \rho_2} k + \frac{\sigma}{\rho_1 + \rho_2} k^3 - \left(2 \frac{\eta_1 + \eta_2}{\rho_1 + \rho_2} \right)^2 k^4 \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота волны, $\rho_{1,2}$ – плотности жидкостей, $k = \omega/V$ – волновое число, V – скорость волны, g – ускорение свободного падения, $\eta_{1,2}$ – вязкости жидкостей. Измерив зависимость $\omega(k)$, и зная $\rho_{1,2}$, $\eta_{1,2}$, с помощью (1) можно вычислить значение σ [2]. При проведении измерений в условиях микрогравитации существенно повышается точность расчета за счет

исключения ошибок, связанных с существенным доминированием гравитационного члена над капиллярным в уравнении (1) на используемых в экспериментах частотах.

Эксперименты проводились на борту французского самолета-лаборатории ZERO-G, совершающего полеты по параболической траектории, что обеспечивало условия микрогравитации в течение 20 сек. В экспериментах использовались жидкости перфторогексан (FC-72) и силиконовое масло вязкостью 1 сСт, в равных объемах налитые в прозрачную кювету с внутренними размерами $35 \times 28 \times 4$ мм. В дне кюветы находился сфокусированный ультразвуковой пьезопреобразователь с рабочей частотой 3 МГц. Преобразователь излучал короткие (1 мс) акустические импульсы, которые фокусировались в области границы раздела жидкостей. Капиллярные волны, возбужденные в центре кюветы, распространялись по поверхности раздела жидкостей. Движение интерфейса записывалось со скоростью 600 к/с цифровой камерой. Из набора полученных изображений для двух точек интерфейса, находящихся друг от друга на небольшом расстоянии d , восстанавливались временные зависимости вертикальных смещений поверхности раздела. Применив к полученным временным формам преобразование Фурье, рассчитывались частотные зависимости фазового сдвига $\Delta\varphi(\omega)$ и находились зависимости скорости волны $V(\omega) = -\omega \cdot d / \Delta\varphi(\omega)$. Волновые числа вычислялись как $k(\omega) = \omega / V(\omega)$. Следуя [2] и пренебрегая вязкостью жидкостей, что допустимо для не слишком больших частот, можно построить зависимость $\omega^2(\rho_1 + \rho_2)/k$ от k^2 , которая теоретически должна представлять собой линейную функцию. Тогда КМН σ можно искать как первый коэффициент линейной аппроксимации этой функции.

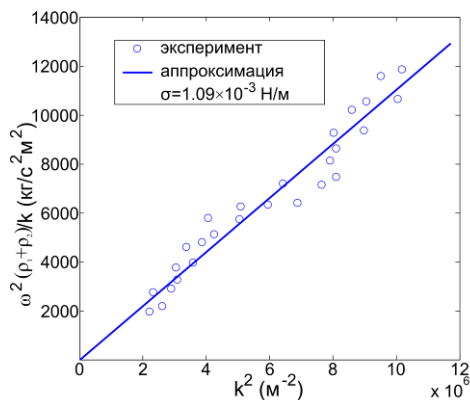


Рис.1 График функции $\omega^2(\rho_1+\rho_2)/k$ от k^2 и ее линейная аппроксимация.

На рис. 1 представлен построенный по экспериментальным данным график величины $\omega^2(\rho_1+\rho_2)/k$ в функции от k^2 . Ее линейная аппроксимация дала следующую величину для значения КМН $\sigma=1.09 \cdot 10^{-3}$ Н/м с ошибкой $\pm 0.2 \cdot 10^{-3}$ Н/м. Эта величина соответствует данным, приведенным в [3], а также значению, которое независимо получено узкополосным методом, в котором ультразвуковое возбуждение гравитационно-капиллярных волн носит квазимонохроматический характер и производится на ряде дискретных частот.

Предложенный метод, характеризующийся импульсным ультразвуковым возбуждением капиллярных волн в условиях микрогравитации, пригоден для быстрого измерения достаточно малых значений коэффициента межфазного натяжения. Корректность метода подтверждена на основе количественного сравнения с результатами независимых экспериментов и в сравнении с литературными данными.

1. *Cinbis C., Khuri-Yakub P.* Rev. Sci. Instrum. 1992, **63**, 3, 2048-2050.
2. *Kumar K., Tuckerman L.* J. Fluid Mech. 1994, **279**, 49-68.
3. *Ward K.* PhD thesis. University of Florida, USA, 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ УЧАСТНИКАХ 2018

Фамилия имя отчество участника стр.

ОТДЕЛ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ

Азаревич Андрей Николаевич	47
Красиков Кирилл Михайлович	50
Самарин Александр Николаевич	58
Хорошилов Артем Леонидович	63

ОТДЕЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Кузнецов Сергей Михайлович	52
Новиков Василий Сергеевич	55

ОТДЕЛ СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Васин Александр Андреевич	133
Катыба Глеб Михайлович	73
Тихановский Артем Юрьевич	60
Черномырдин Никита Викторович	128
Чучупал Сергей Вячеславович	66

ОТДЕЛ ЛАЗЕРНЫХ КРИСТАЛЛОВ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

Гладкий Виталий Юрьевич	7
Гурьев Денис Аркадьевич	12
Жлуктова Ирина Вадимовна	14
Камынин Владимир Александрович	16
Поносова Анастасия Александровна	28
Трикшев Антон Игоревич	36
Филатова Серафима Андреевна	42

ОТДЕЛ КОГЕРЕНТНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКИ

Мамонов Дмитрий Николаевич	19
----------------------------	----

ОТДЕЛ ЛАЗЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ФОТОНИКИ

Пирпоинт Ксения Александровна	23
Шилова Галина Валерьевна	45

ОТДЕЛ КОЛЕБАНИЙ

Бухарина Айгуль Булатовна	116
Душина Ляна Александровна	11
Овчаренко Борис Дмитриевич	23
Понарина Мария Владимировна	26
Ушаков Александр Александрович	39

ОТДЕЛ СВЕТОИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Антонова Ирина Александровна	97
Брагина Вера Александровна	113
Кудрявцев Олег Сергеевич	78
Мартьянов Артем Константинович	82
Поминова Дарья Вячеславовна	122
Ромшин Алексей Максимович	32
Седов Вадим Станиславович	84
Фаррахова Дина Салимовна	125
Чернов Александр Игоревич	95

ОТДЕЛ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

Балабанов Дмитрий Алексеевич	131
Васильков Дмитрий Григорьевич	103
Диас Михайлова Джоанна Екатерина	106
Кончечков Евгений Михайлович	110, 119
Ким Константин Алексеевич	108

ОТДЕЛ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И МЕДИЦИНСКИХ ПРОБЛЕМ

Веремьева Мария Владимировна	117
------------------------------	-----

ОТДЕЛ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕХНИКИ

Гладилин Андрей Александрович	72
-------------------------------	----

**ОТДЕЛ ТЕХНОЛОГИИ И ИЗМЕРЕНИЯ АТОМНОГО
МАСШТАБА**

Коваленко Станислав Леонидович	90
Комаров Никита Сергеевич	93

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ

Богачев Николай Николаевич	100
----------------------------	-----

ОТДЕЛ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Кузнецов Сергей Викторович	81
Числов Артем Сергеевич	86

НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЛНОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Макалкин Дмитрий Ильич	136
------------------------	-----

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

Васильев Дмитрий Антонович	69
----------------------------	----

ЦЕНТР ФИЗИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Ганин Даниил Валентинович	4
---------------------------	---

Научное издание

**Школа-конференция
молодых ученых
«ПРОХОРОВСКИЕ НЕДЕЛИ»**

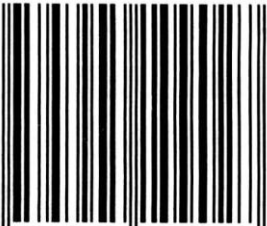
Материалы научной школы-конференции

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

Дизайн обложки М.Н. Маяковой

Подписано в печать 08.10.2018
Формат 60×90^{1/16}. Усл. печ. л. 8,88.
Тираж 100 экз. Заказ № 130554.
Отпечатано в ООО «МДМпринт»
г. Москва, тел. +7(495) 256-10-00

ISBN 978-5-905109-02-7



9 785905 109027