

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук»



**ШКОЛА - КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
«ПРОХОРОВСКИЕ НЕДЕЛИ»**



ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

18 - 20 октября 2022 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»



ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
«ПРОХОРОВСКИЕ НЕДЕЛИ»

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

18–20 октября 2022 г.
Москва

УДК 53; 535; 537; 538,9

V Школа-конференция молодых учёных «Прохоровские недели». 18–20 октября 2022 г., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Москва, Российская Федерация. Тезисы докладов. — Москва, 2022. — 158 с.

ISBN 978-5-905109-08-9

В сборник включены тексты подготовленных молодыми учёными докладов, представленных на школе-конференции молодых учёных Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН) «Прохоровские недели», даты проведения — 18–20 октября 2022 г. Форум научной молодежи – молодых ученых, аспирантов и студентов старших курсов научных организаций и университетов – включает оригинальные доклады участников по всем основным направлениям научной деятельности ИОФ РАН.

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»
при поддержке
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
(соглашение № 075-15-2022-315 от 20 апреля 2022 г.).

Председатель конференции:

В.В. Глушков, д.ф.-м.н., доцент (ИОФ РАН).

Оргкомитет:

С.В. Демишев, д.ф.-м.н., профессор,	М.Н. Маякова, к.х.н.
М.Я. Гришин, к.ф.-м.н.	Д.В. Поминова, к.ф.-м.н.
Е.Э. Дунаева, к.т.н.	И.Д. Романишкин
Е.В. Захарова	С.А. Филатова, к.ф.-м.н.
А.В. Кулебякин, к.т.н.	В.Е. Шукшин, к.ф.-м.н.

Программный комитет:

Председатель – В.В. Глушков, д.ф.-м.н., доцент,
С.В. Демишев, д.ф.-м.н., профессор, Д.В. Поминова, к.ф.-м.н.
Е.Э. Дунаева, к.т.н., С.А. Филатова, к.ф.-м.н.
А.В. Кулебякин, к.т.н. В.Е. Шукшин, к.ф.-м.н.
М.Н. Маякова, к.х.н.

Время проведения конференции — 18–20 октября 2022 г.
Место проведения — ИОФ РАН, Москва, ул. Вавилова, д.38, корп. 1, 3 этаж,
конференц-зал

<https://www.gpi.ru/sci/conferences/youngconf/2022/>

© Коллектив авторов, 2022

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

Содержание

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА.....	7
Висмутовые волоконные лазеры с накачкой по оболочке, излучающие в области длин волн 1.4–1.5 мкм.....	7
Исследование однопроходного и двухпроходного усиления ультракоротких импульсов в композитном Er/Yb активном волокне	11
Автоэлектронная эмиссия скомканного CVD графена, полученного методом лазерной печати.....	14
Сверхвысокая концентрация иттербия в кварцевых волоконных световодах с фосфороалюмосиликатной матрицей стекла сердцевины... ..	17
Волоконные световоды с сердцевиной из чистого кварцевого стекла с избытком и дефицитом кислорода.....	20
Антистоксов комбинационно-параметрический лазер на кристалле CaMoO_4 с внутррезонаторной синхронной накачкой	23
Сравнение параметров импульсной генерации в гантелевидном и кольцевом резонаторах гольмиевого волоконного лазера.....	26
КВАНТОВАЯ МАКРОФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ	29
Поверхностная проводимость в топологическом Кондо изоляторе SmB_6	29
Аномальный вклад в эффекте Холла в парамагнитной фазе $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{B}_{12}$ с динамическими зарядовыми страйпами	32
Дегградация ПВХ при термо- и УФ-воздействиях: данные спектроскопии КР	35
Покрытые графеном Ni-иглы для СТМ-литографии атомной точности... ..	38
Магнитные свойства Ho-лангасита	41
Особенности влияния гостевых молекул на теплофизические и электронные свойства гидратов.....	44
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, АКТИВНЫЕ СРЕДЫ И НАНОСТРУКТУРЫ.....	46
Получение наночастиц бора методом лазерной абляции в жидкости.....	46
Влияние фазового состава на радиопоглощающие свойства твердых растворов $\text{PbTi}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$ на микрополосковой линии в СВЧ-диапазоне	49
Коротковолновый сдвиг максимума фотолюминесценции нанотетрапедов теллурида кадмия с наконечниками из селенида кадмия.....	52
Расчет линии ликвидуса и линии стеклования сплава $\text{Ni}_{62}\text{Nb}_{38}$ для широкого диапазона давлений.....	55

Изучение пленок феррониобата бария-неодима методом спектральной эллипсомерии	57
Квази-непрерывные характеристики генерации керамики Yb:YSAG	59
Самодиффузия воды в бесфторных протонообменных мембранах с различным соотношением гидрофильных и гидрофобных блоков	62
Анализ влияния механических деформаций на электронные характеристики графена, осажденного на диэлектрическую подложку из дителлурида молибдена	66
Разработка и оптимизация метода получения наноразмерного силиката кальция с использованием биологически активных стабилизаторов для регенеративной медицины	69
Синтез в СВЧ плазме нанокристаллических алмазных плёнок, легированных германием	71
Зависимость механических свойств пористого нитинола от структуры кристаллической матрицы	73
Люминесцентные аэрогели смешанных оксидов $\text{Eu}_2\text{O}_3/\text{Gd}_2\text{O}_3$, модифицированные органическими сенсибилизаторами	75
Плазмонно-диэлектрическая наноструктура «наноалмаз в чашке» для усиления флуоресценции SiV-центров	77
Стехиометричный фторидофосфат KVPO_4F и углеродный композит на его основе как материал для обратимой де/интеркаляции ионов щелочных металлов	80
Изготовление микропористого алмаза из синтезированного в СВЧ плазме композита алмаз-германий	83
Исследование эффективности стабилизации наночастиц селена кокаמידопропиламинноксидом	85
Синтез и исследование структуры нанокompозита $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$	88
Исследование люминесценции стабильных коллоидных растворов наночастиц $\text{LaF}_3:\text{Nd}^{3+}$, диспергированных в диметилсульфоксиде	90
Исследование свойств углеродных точек для применения в органических светодиодах (OLED)	93
Влияние отжига в CH_4/H_2 СВЧ плазме на фотолюминесценцию порошков $\text{SrF}_2:\text{Eu}$	95
Магнитная фазовая диаграмма и магнитоотрицательные свойства многокомпонентных сплавов $\text{Tb}_{0.16}\text{Ho}_{0.84}(\text{Fe},\text{Co})_2$	97
Сравнительное исследование кристаллов диоксида циркония, частично	

стабилизированного оксидами редкоземельных элементов	99
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	101
Фазовые превращения материалов в смесях порошков металлов и BN (sub/hex) с катализаторами в гиротронном разряде	101
Особенности формы завершеного скользящего разряда в диапазоне давлений от 10 до 30 торр.....	103
Воздействие прямого пьезоразряда на состав воды Milli-Q	105
Электродинамика поверхностной волны, поддерживающей плазменный столб в сантиметровом диапазоне радиоволн	108
Амбиполярная диффузия газоразрядной плазмы в магнитном поле	110
Действие обработанного холодной плазмой раствора Хенкса на генерацию TGF- β мононуклеарными лейкоцитами человека	113
Некоторые особенности и различия токовых слоев, формируемых в 2D и 3D магнитных конфигурациях	116
ФИЗИКА В БИОЛОГИИ, МЕДИЦИНЕ, СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ И ЭКОЛОГИИ	119
Оптическая когерентная томография как метод интраоперационной нейродиагностики глиом головного мозга	119
Исследование режимов работы терагерцового микроскопа на основе эффекта твердотельной иммерсии.....	122
Исследование гемо- и лимфодинамики в процессе заживления лазерной раны на коже мыши	125
Химически-активированная лазерная десорбция/ионизация с переносом электрона	128
Анализ структуры сополимеров метил(этилен)фосфата методом спектроскопии комбинационного рассеяния света	131
Оптические биосенсорные системы для высокочувствительного определения концентрации низкомолекулярных микотоксинов.....	134
Макалувамин G — рамановская метка для регистрации никотинового рецептора	136
Исследование спектров комбинационного рассеяния растворов бета-каротина и ликопина.....	139
Определение специфичности и чувствительности метода определения фолиевой кислоты с помощью безметочного биосенсора на основе спектрально-корреляционной интерферометрии	142
Комбинационное рассеяние в диагностике биоптатов внутричерепных	

опухолей.....	145
Метод высокочувствительной детекции внеклеточных везикул на основе магнитных наномаркеров, разработанный с помощью визуализирующей проточной цитометрии	147
Исследования электронных свойств молекул ксенобиотиков методом спектроскопии диссоциативного захвата электронов	150
ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ: НОВЫЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ	152
Разработка системы для вычисления расстояния до объекта на основе построения карты глубин	152
АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ	154

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

Висмутовые волоконные лазеры с накачкой по оболочке, излучающие в области длин волн 1.4–1.5 мкм

Вахрушев А.С.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук»,*

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

E-mail: as.vahrush@yandex.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-7-10

Хорошо известно, что висмутовые световоды можно использовать в качестве активных сред для лазеров и усилителей, работающих в ближнем ИК диапазоне, даже в тех областях, где отсутствуют эффективные световоды, легированные редкоземельными ионами [1]. Однако низкие концентрации висмута в таких световодах вынуждали осуществлять накачку лазеров в сердцевину активного световода с помощью одномодовых источников излучения, возбуждая висмутовые центры непосредственно на верхний лазерный уровень (квази-трёхуровневая схема генерации) [2]. По этой причине существенным образом снижается возможность масштабирования выходной мощности таких лазеров.

В данном исследовании будут представлены результаты по разработке первых в мире висмутовых лазеров с накачкой в оболочку излучением многомодовых лазерных диодов, излучающих на длине волны 808 нм. Важным преимуществом такого типа лазеров по сравнению с лазерами, накачиваемыми в сердцевину активного световода, является возможность ввода излучения (с помощью доступных объединителей излучения) одновременно от нескольких диодов накачки, позволяя достигать мощностей 1 кВт и более.

Первый висмутовый волоконный лазер с накачкой в оболочку был реализован на основе световода с сердцевиной из легированного <math><0.02\text{ ат.}\%</math> висмута $\approx 50\text{ мол.}\% \text{ GeO}_2$ — $\approx 50\text{ мол.}\% \text{ SiO}_2$ стекла, в котором формировались висмутовые активные центры, ассоциированные с кремнием (ВАЦ-Si). Диаметр сердцевины такого световода составлял ≈ 8 мкм, отсечка второй моды – 1.35 мкм.

Висмутовый световод был вытянут в полимерном покрытии, имеющем более низкий показатель преломления (1.394), чем у кварцевого стекла, что позволяло сформировать световедущую структуру во внутренней кварцевой оболочке световода. Спектр поглощения по оболочке висмутового световода, измеренный методом облома, представлен на Рис. 1(а), где можно наблюдать полосу с максимумом на длине волны 820 нм, принадлежащую ВАЦ-Si с энергетическими уровнями, приведенными на вставке Рис. 1(а).

На Рис. 1(б) представлена схема висмутового лазера с накачкой в оболочку. Для ввода излучения накачки в активный световод ($L = 200$ м) использовался коммерческий многомодовый объединитель накачки и сигнала $(2+1) \times 1$. Для устранения непоглощённой мощности накачки в схему встраивалось устройство для вывода оболочечных мод. Исследование работы лазера было проведено в различных конфигурациях резонатора, где обратная связь обеспечивалась зеркалами M1 и M2 в виде сколотого под прямым углом торца световода, волоконной брэгговской решётки (ВБР) или широкополосного зеркала Саньяка.

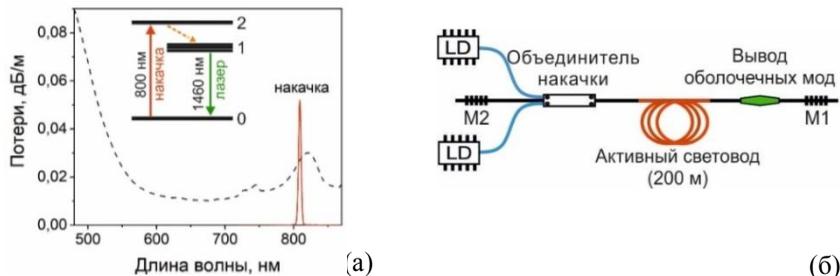


Рис. 1. Спектр оптических потерь в оболочке исследуемого висмутового световода (а) (вставка — схема уровней ВАЦ-Si) и схема висмутового волоконного лазера с накачкой в оболочку (б).

В конфигурации 1 в качестве обоих зеркал использовались сколотые под прямым углом торцы световодов, обеспечивающие 4 % отражение (режим свободной генерации). Длина волны генерации в таком случае была 1430 нм и определялась спектральным положением максимума коэффициента усиления. Зависимость выходной мощности лазера от мощности накачки представлена на Рис. 2. Видно, что увеличение мощности накачки приводит изначально к росту мощности генерации с последующим

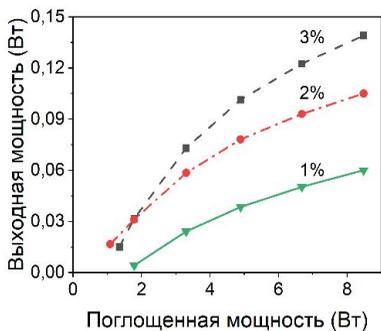


Рис. 2. Зависимость выходной мощности генерации от поглощенной мощности накачки для различных конфигураций лазера (1 – треугольники; 2 – квадраты; 3 – кружки)

(конфигурация 3 с M2 в виде зеркала Саньяка с отражением ~20–30 %) эффективность лазера составила 2 %. Нелинейный вид полученных зависимостей может быть объяснен с помощью схемы энергетических уровней (Рис. 1(а), вставка). Видно, что схема получения лазерной генерации с использованием многомодовых источников излучения на 808 нм является трёхуровневой. В таком случае накачка ВАЦ-Si осуществляется на верхний уровень, с которого происходит преимущественно их спонтанный переход на верхний лазерный уровень, а затем вынужденно на нижний (основной) лазерный уровень. Эффект насыщения выходной мощности объясняется относительно долгим временем спонтанного перехода ВАЦ-Si с вышерасположенного уровня на верхний лазерный уровень, что заметным образом начинает сказываться при больших мощностях накачки. В заключение хотелось бы также отметить, что эффективность лазеров такого типа может быть заметным образом улучшена оптимизацией конструкции лазера, созданием нового дизайна активного световода (с радиально-несимметричной формой внутренней оболочки) и др.

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Фирстову С.В. за постановку научной задачи и обсуждение результатов.

стремлением её к насыщению.

Дифференциальная эффективность такого лазера по начальному участку составила около 1 %. В конфигурациях лазера 2 и 3 с ВБР в качестве глухого зеркала (M1), длина волны генерации составляла 1460 нм, где обеспечивался требуемый коэффициент отражения, близкий к 100 %. В конфигурации 2 с выходным зеркалом в виде торца световода была достигнута заметно лучшая эффективность ~3 % ($P_{\text{вых}} \approx 140 \text{ мВт}$), тогда как в более закрытом резонаторе

1. Dianov E. Light Sci. Appl. 2012, **1**, e12.
2. Firstov S.V., Khopin V.F., Bufetov I.A. et al. Opt. Express 2011, **19**, 19551–19561.

Исследование однопроходного и двухпроходного усиления ультракоротких импульсов в композитном Er/Yb активном волокне

Зверев А.Д., Камынин В.А.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва.*

E-mail: izverevad@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-11-13

Волоконные оптические усилители, работающие в полумикронном диапазоне длин волн, применяются в различных областях науки и техники. Их используют в оптических линиях связи для увеличения дальности передачи сигнала [1, 2]. Также с их помощью решается проблема низкой средней и пиковой мощности излучения волоконных лазерных источников ультракоротких импульсов (УКИ) [3]. Стандартные эрбиевые волокна с кварцевой сердцевиной обладают коэффициентом усиления слабого сигнала $\sim 0.01\text{--}0.03$ дБ/см. Для увеличения коэффициента усиления необходимо повышение концентрации активных ионов редкоземельных элементов в сердцевине волокна. Более подходящими для легирования эрбием или системой Er/Yb являются фосфатные стекла. На их основе создаются волокна с концентрацией активных ионов $\sim 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и коэффициентом усиления ~ 5 дБ/см [4]. Минусами этих волокон являются их быстрая деградация на воздухе и большие потери в местах соединения со стандартными оптическими компонентами. В последние годы стали создаваться специальные композитные волокна с фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой, которые обладают высоким коэффициентом усиления, легко соединяются в лазерных системах со стандартными оптическими компонентами и не деградируют на воздухе. В нашей работе проводилось сравнение усиления УКИ в специальном композитном волокне, сильнолегированном системой Er/Yb при однопроходной (ОС) и двухпроходной (ДС) схемах усиления, которые изображены на рис. 1 (А) и (Б).

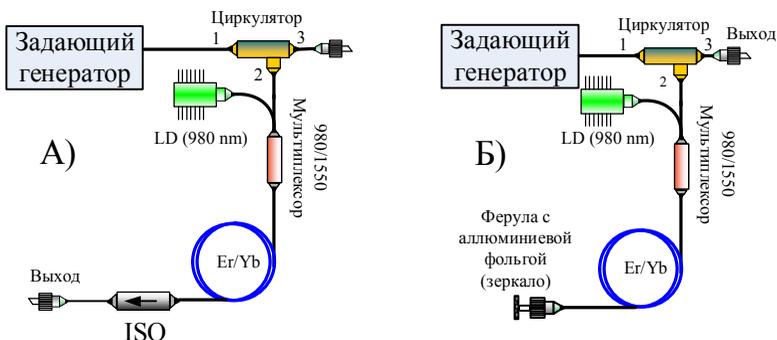


Рис. 1. Однопроходная (А) и двухпроходная (Б) схемы усиления в композитном Er/Yb волокне. LD – лазерный диод; ISO – оптический изолятор.

В композитном волокне усиливалось излучение от задающего генератора (ЗГ). ЗГ генерировал УКИ на центральной длине волны излучения 1553 нм со средней выходной мощностью 0.8 мВт. При этом ширина спектра составляла 8 нм, а частота следования импульсов 92 МГц. В дальнейшем излучение от ЗГ проходило через циркулятор, в котором потери при распространении из одного канала в другой составляли 1.5 дБ. Затем сигнал усиливался в композитном Er/Yb волокне длиной 30 см, которое накачивалось через мультиплексор лазерным диодом на длине волны излучения 980 нм, и в случае ОС усиления (Рис. 1 (А)) выводился через оптический изолятор. В случае ДС усиления (Рис. 1(Б)) после активного волокна была установлена ферула с фольгой для отражения сигнала (потери составляли 10 %). За счет этого, сигнал дважды распространялся по усиливающему волокну, и его характеристики исследовались на выходе 3 из циркулятора. Зависимости мощности усиленного сигнала и спектра на выходе от мощности накачки при ОС усилении изображены на Рис. 2 (А) и (В), соответственно. Аналогичные зависимости для ДС усиления показаны на Рис. 2 (Б) и (Г).

При максимальной мощности накачки усиление УКИ в ОС составило 7.3 дБ. С учётом потерь на циркуляторе и отражении при той же мощности накачки, усиление в ДС составило 7.9 дБ (учитывалось усиление только части спектра, относящейся к импульсному сигналу). Таким образом, при использовании 30 см

композитного Er/Yb волокна, наиболее эффективным с точки зрения усиления УКИ является использование ДС.

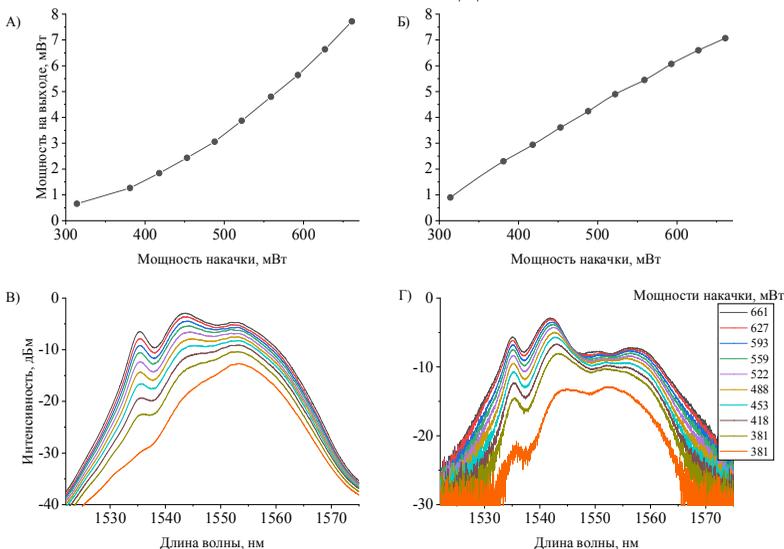


Рис. 2. Зависимости мощности сигнала и спектры на выходе для однопроходного (А), (В) и двухпроходного усиления (Б), (Г) соответственно.

Активные волокна были изготовлены в рамках научного проекта РФФИ № 20-02-00425.

Работа выполнена на базе Научного центра мирового уровня «Фотоника» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ 075-15-2020-912).

1. Payne D.N. Fiber Integr. Opt. 1992, **11**(3), 191–219.
2. Naji A.W., Hamida B.A., et al. International Journal of Physical Sciences. 2011, **6**(20), 4674–4689.
3. Cao W.H., Wai P.K.A. Opt. Lett. 2003, **28**(4), 284–286.
4. Boetti N.G., Pugliese D., et al. Applied Sciences. 2017, **7**(12), 1295.

Автоэлектронная эмиссия скомканного CVD графена, полученного методом лазерной печати

Курочицкий Н.Д., Комлёнок М.С., Рыбин М.Г.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: kuronick@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-14-16

Получение низкоразмерных материалов открыло возможности для создания новых элементов электроники и модификации старых, особенно полевых эмиттеров из-за настраиваемой ширины запрещённой зоны и электронных свойств [1–3]. Интерес к подобным материалам существенно вырос с исследованием уникальных свойств графена [4]. Активно исследуется графен в качестве материала для создания полевых эмиттеров [5–10]. Известные методы создания графеновых полевых эмиттеров трудоёмки или включают загрязнение исходного материала.

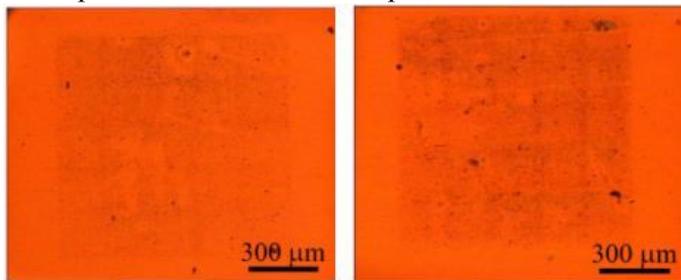


Рис. 1. Оптический снимок однопроходного (слева) и трёхпроходного (справа) эмиттера

В докладе представлен новый подход к созданию графеновых полевых эмиттеров на различных подложках при комнатной температуре в нормальных условиях. Необходимая форма и ориентация графеновых чешуек относительно электрического поля создаётся методом лазерно-индуцированного прямого переноса высококачественного однослойного CVD графена. Созданы однопроходный и трёхпроходный эмиттеры. Для обеспечения многопроходности донор смещается относительно акцептора, и

процедура переноса повторяется. Оптические изображения эмиттеров представлены на рис. 1. Предложенная техника позволяет формировать произвольные структуры эмиттеров без потери изначального качества синтезированного графена, что подтверждается КР-спектроскопией (рис. 2). Изучена эмиссия отпечатков скомканного графена площадью $1 \times 1 \text{ мм}^2$ (рис. 3). Перенесённые чешуйки графена имеют высокие адгезивные и эмиссионные характеристики. Полученные эмиссионные характеристики ($E_{thr} = 4 \text{ В/мкм}$, $\beta = 3300$) сопоставимы с характеристиками эмиттеров, созданных другими методами ($E_{thr} = 1.5 \text{ В/мкм}$, $\beta = 3000$ [11]; 3.09, 3200 [12]).

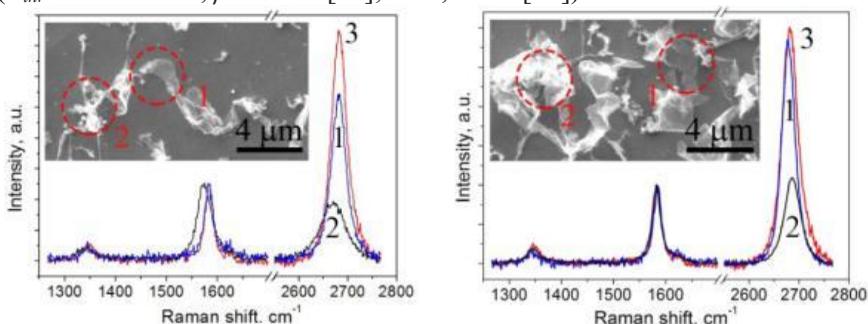


Рис. 2. Спектры КР однопроходного (слева) и трёхпроходного (справа) эмиттера и изображения СЭМ чешуек, с которых сняты спектры:

- 1 — плоский графен, 2 — скомканный графен,
- 3 — изначальный графен.

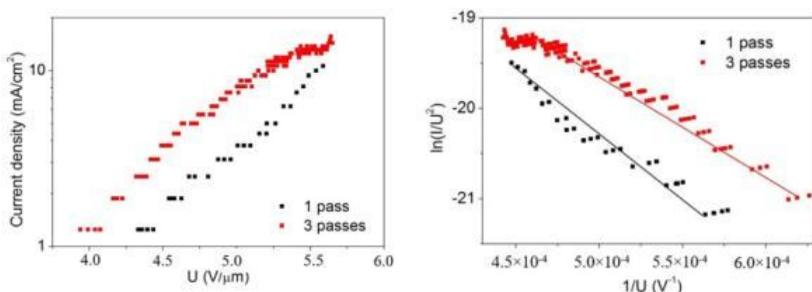


Рис. 3. ВАХ (слева) и ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма (справа) однопроходного и трёхпроходного эмиттера

Авторы выражают благодарность Пивоварову П.А., Образцовой Е.Д., Клещу В.И., Поповичу А.Ф., Савину С.С.

1. Bonard J.-M., Kind H., Stöckli T., Nilsson L.-O. *Solid State Electron.* 2001, **45**, 893–914.
2. Patra A., More M.A., Late D.J., Rout C.S. *J. Mater. Chem. C.* 2021, (9), 11059.
3. Kianinia M., Xu Z.-Q., Toth M., Aharonovich I. *Appl. Phys. Rev.* 2022, (9), 011306.
4. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., et al. *Science.* 2004, **306**, 666.
5. Koh A.T.T., Foong Y.M., Pan L., et al. *Appl. Phys. Lett.* 2012, **101**, 183107.
6. Guo Y., Guo W. *J. Phys. Chem. C.* 2013, 117, 692–696.
7. Wang Y., Yang Y., Zhao Z., et al. *Appl. Phys. Lett.* 2013, **103**, 033115.
8. Chen L., Yu H., Zhong J., et al. *Mater. Sci. Eng. B.* 2017, **220**, 44–58.
9. Wang Q., Zhang Z., Liao Q., et al. *RSC Adv.* 2018, **8**, 16207–16213.
10. Ahsan R., Sakib M.A., Chae H.U., Kapadia R. *Phys. Rev. Appl.* 2020, **13**, 024060.
11. Kleshch V.I., Bandurin D.A., Serbun P., et al. *Status Solidi B.* 2018, **255**, 1700270.
12. Jeong H.J., Jeong H.D., Kim H.Y., et al. *Small.* 2013, (9), 2182–2188.

Сверхвысокая концентрация иттербия в кварцевых волоконных световодах с фосфоалюмосиликатной матрицей стекла сердцевины

Бобков К.К., Михайлов Е.К., Алешкина С.С.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук»,*

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

E-mail: egor.mikhailov@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-17-19

Увеличение концентрации иттербия в кварцевых волоконных световодах до сверхвысоких значений способствует сокращению длины лазерного резонатора, что представляет интерес при создании одночастотных лазеров и лазеров с высокой частотой повторения. Также, увеличение концентрации иттербия в усилителях с большой площадью моды (БПМ) с применением пьедестальной структуры [1] является перспективным способом дальнейшего увеличения пиковой мощности на выходе волоконных усилителей. Для последнего применения желателен использование волоконных световодов, имеющих сердцевину с фосфоалюмосиликатной (ФАС) матрицей, что достигается солегирированием Al_2O_3 и P_2O_5 в концентрациях, близких к эквимольным. Это приводит к образованию соединения $AlPO_4$, которое увеличивает растворимость редкоземельных элементов и имеет показатель преломления, близкий к показателю преломления чистого кварца [2]. Уменьшение показателя преломления сердцевины значительно упрощает изготовление вышеупомянутого пьедестала, легированного германием. В этом случае достижение максимально возможной концентрации Yb_2O_3 в сердцевине необходимо для максимального сокращения длины активного световода.

Целью настоящей работы являлось выявление предельной концентрации Yb_2O_3 в волоконных световодах с ФАС матрицей сердцевины. С помощью метода модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD) была изготовлена серия ФАС световодов, легированных Yb_2O_3 вплоть до концентрации 2.41 мол.%. У полученных световодов были измерены серые потери, потери за

счет фотопотемнения и эффективность преобразования накачки в сигнал (ЭПН). Для измерения ЭПН использовалась схема волоконного усилителя с попутной накачкой и сигналом (мощность сигнала составляла около 10 мВт на 1030 нм, мощность накачки на длине волны 974.5 нм ~460 мВт).

Было обнаружено, что с ростом концентрации Yb_2O_3 ФАС световоды почти теряют свои активные свойства – при максимальной концентрации Yb_2O_3 2.41 мол.% (стекло было дополнительно легировано 16 мол.% AlPO_4) ЭПН падает до ~10 %. Только уменьшение концентрации Yb_2O_3 до 1.3 мол.% (18 мол.% AlPO_4) позволило достигнуть высокой ЭПН — на оптимальной длине световода 4.5 см достигалась ЭПН 79 % (Рис. 1). Причем всего ~3.8 см световода было достаточно, чтобы поддерживать ЭПН выше 70 %, что близко к максимальному значению. Насколько нам известно, усилитель, легированный Yb, с длиной активного световода менее 4 см, является самым коротким высокоэффективным усилителем, легированным Yb, из когда-либо зарегистрированных среди световодов на основе кварцевого стекла. В дополнение к этому, световод обладает относительно низкой разницей показателей преломления сердцевины и оболочки 0.01 и малыми потерями за счет фотопотемнения (менее 200 дБ/м на длине волны 633 нм, что соответствует нескольким дБ/м на 1030 нм), что крайне многообещающе для разработки сверхкоротких БПМ усилителей, легированных иттербием, на основе пьедестальной структуры.

Наблюдаемое снижение активных свойств ФАС световодов с высокой концентрацией иттербия может быть объяснено концентрационным тушением люминесценции, возможный механизм которого был предложен ранее в [3]. Более того, другая исследовательская группа недавно сообщила об эффектах ион-ионного взаимодействия в волоконных усилителях, легированных Yb^{3+} , как в кварцевых, так и в фосфатных световодах [4]. Эти теории предполагают наличие соответствующих эффектов, таких как сокращение времени жизни, появление непросветляемых потерь и снижение квантового выхода люминесценции. Для выявления четкой причины деградации ЭПН в разработанных световодах с самым высоким содержанием Yb, были тщательно изучены и измерены все параметры, упомянутые выше. Было обнаружено, что все ожидаемые эффекты (снижение времени жизни, рост непросветляемых потерь и

одновременное уменьшение квантового выхода), имеют место в исследованных световодах с предельно высокой концентрацией иттербия, что говорит в пользу выдвинутой теории о концентрационном тушении люминесценции.

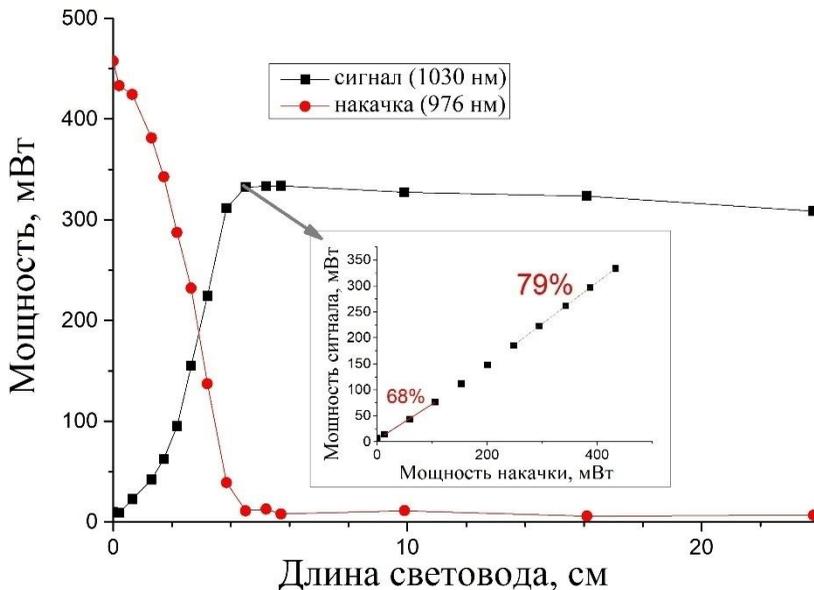


Рис. 1. Зависимость мощности накачки и сигнала от длины световода (вставка — эффективность около оптимальной длины).

Авторы выражают благодарность к.х.н. Липатову Д.С. за помощь в изготовлении стеклянных заготовок световодов и к.ф.-м.н. Лихачеву М.Е. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00347.

1. Sidharthan R., Lin D., Lim K.J., et al. Opt. Lett. 2020, **45**, 3828–3831.
2. Likhachev M.E., Bubnov M.M., Zotov K.V., et al. Opt. Lett. 2009, **34**, 3355–3357.
3. Kir'yanov A.V., Barmenkov Y.O., Martinezet I.L., et al, Opt. Express 2006, **14**, 3981–3992.
4. Wu J., Zhu X., Xia C., et al. Opt. Express 2019, **27**, 28179–28193.

**Волоконные световоды
с сердцевинной из чистого кварцевого стекла
с избытком и дефицитом кислорода**

Поспелова Е.А.^{1,2}, Кашайкин П.Ф.¹

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук»,*

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

*2- Пермская научно-производственная приборостроительная
компания, Пермь*

E-mail: pospelovaea@pnppk.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-20-22

В космической технике, в атомной энергетике и военных применениях востребованы специальные радиационно-стойкие волоконные световоды (ВС). При воздействии ионизирующего излучения в сетке кварцевого стекла ВС создаются точечные дефекты — радиационные центры окраски (РЦО), которые поглощают световой сигнал, т.е. возникает радиационно-наведенное поглощение (РНП) света [1].

Метод MCVD позволяет создать радиационно-стойкие ВС с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла и фторированной оболочкой. Для повышения радиационной стойкости известны два подхода к синтезу сердцевинной ВС в MCVD-процессе, а именно с избытком [2] и дефицитом кислорода [3]. (кислородоизбыточные и кислорододефицитные ВС соответственно). Интересно сравнить, как ведут себя ВС, изготовленные по двум подходам, при воздействии ионизирующего излучения. Существует ли разница в поведении РНП и, если да, то какими РЦО она обусловлена. Поэтому целью работы было исследование РНП в ВС изготовленных двумя способами синтеза сердцевинной в процессе MCVD.

Изготовленные MCVD ВС облучались на установке ГУТ-200М с активным источником ⁶⁰Со при мощности дозы 1.2 Гр/с. В процессе облучения происходила регистрация спектров РНП с помощью спектрометров Avantes AvaSpec-3648 в диапазоне 200–1100 нм и Ocean Optics NIR-512 в диапазоне 900–1750 нм. Начальные потери и потери после облучения измеряли методом обрыва.

Из гауссова разложения спектров РНП при дозе 1 кГр для кислородоизбыточного (рис. 1 а) и кислорододефицитного (рис. 1 б) ВС видно, что РНП на рабочей длине волны 1550 нм обусловлено в основном полосами поглощения самозахваченных дырок в сетке кварцевого стекла с центрами 1.1 и 2.6 эВ, которые подавлены более значительно в кислорододефицитном ВС. Таким образом, кислорододефицитные ВС проявляют большую радиационную стойкость при малых дозах ($\sim 10^3$ Гр), из-за большего подавления самозахваченных дырок.

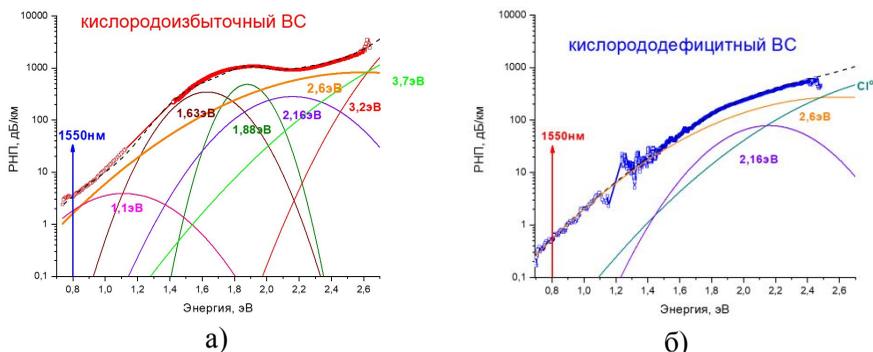


Рис. 1. Спектры РНП при дозе 1 кГр и их разложения на гауссовы компоненты для кислородоизбыточного а); кислорододефицитного б) ВС.

Однако, при дозе ~ 1 МГр большую радиационно-стойкость проявляют кислородоизбыточные ВС, так как РНП определяется уже не самозахваченными дырками, а длинноволновым поглощением, которое больше подавляется при избытке кислорода (рис. 2).

Таким образом, в данной работе проведены сравнительные исследования РНП в кислородоизбыточных и кислорододефицитных ВС, изготовленных методом MCVD и определены РЦО, ограничивающие радиационную стойкость в обоих типах световодах при малых и больших дозах.

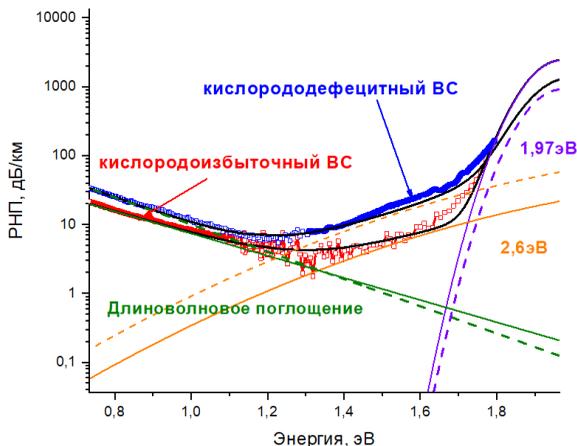


Рис. 2. Спектры РНП при дозе 1.2 МГр и их разложения на гауссовы компоненты для кислородоизбыточного (красный цвет) и кислорододефицитного (синий цвет) ВС.

Авторы выражают благодарность Томашуку А.Л. за постановку научной задачи и обсуждение результатов, Ероньяну М.А. за предоставление ВС, изготовленного при дефиците кислорода, и Салганскому М.Ю., за изготовление преформы ВС с избытком кислорода.

1. Griscom D.L. J. Non-Cryst. Solids. 2006, **352**, 2601–2617.
2. Tomashuk A.L., Salgansky M.Yu., Kashaykin P.F., et al. J. Lightwave Technol. 2015, **32**(2), 213–219.
3. Eronyan M.A., Devetyarov D.R., Reytskii A.A., et al. Materials Letts. 2021, **292**, 129628.

Антистоксов комбинационно-параметрический лазер на кристалле CaMoO_4 с внутриврезонаторной синхронной накачкой

Терещенко Д.П., Лапина М.Д.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: tereshenko.mitya2018@yandex.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-23-25

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) — хорошо известный $\chi^{(3)}$ -нелинейный эффект, позволяющий эффективно преобразовывать лазерное излучение в ближнем инфракрасном диапазоне с понижением частоты. Также $\chi^{(3)}$ -нелинейность позволяет реализовывать параметрическую генерацию антистоксовых компонент ВКР, что требует поддержания фазового синхронизма четырёхволнового взаимодействия. Особый интерес вызывает возможность преобразования спектральных и временных характеристик излучения с помощью ВКР: сжатие ультракоротких импульсов при синхронной накачке [1] и выделение одиночных ультракоротких импульсов [2]. В данной работе продемонстрирована генерация одиночного ультракороткого импульса в антистоксовом лазере на кристалле CaMoO_4 при внутриврезонаторной синхронной накачке без использования высоковольтных электрооптических устройств.

На рис. 1 представлена оптическая схема лазера. Источник возбуждения ВКР представляет собой ИАГ: Nd^{3+} -лазер с ламповой накачкой и пассивной синхронизацией мод, резонатор которого образован вогнутым зеркалом З1 и выходным зеркалом ОС. В пассивном затворе используется краситель 3274, находящийся в контакте с зеркалом З1. Селекция поперечных мод осуществляется диафрагмой А, а выделение линейной поляризации — с помощью тонкопленочного поляризатора П. Внутри резонатора находится также ВКР-активный кристалл CaMoO_4 , вырезанный под углом не критичного к угловой расстройке фазового синхронизма стокс-антистоксова комбинационно-параметрического взаимодействия. Резонатор ВКР-лазера состоит из трех зеркал ОС, ВЗ и З2. Зеркало З2

имеет возможность линейного перемещения для синхронизации времени обхода резонаторов ВКР-лазера и лазера накачки.

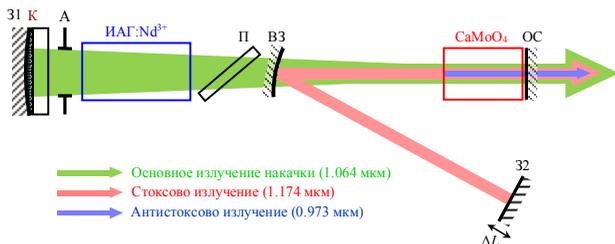


Рис. 1. Оптическая схема лазерной системы: ИАГ:Nd³⁺ и CaMoO₄

Экспериментально была получена ВКР-генерация со стоксовым сдвигом на длине волны 1.174 мкм и антистоксовым сдвигом на 0.973 мкм. Длительность стоксова импульса была измерена с помощью стрик-камеры и составила 7 пс. На рис. 2 представлены осциллограммы цугов выходного излучения лазера, на которых видно, что на длине волны 0.973 мкм генерируется одиночный ультракороткий импульс.

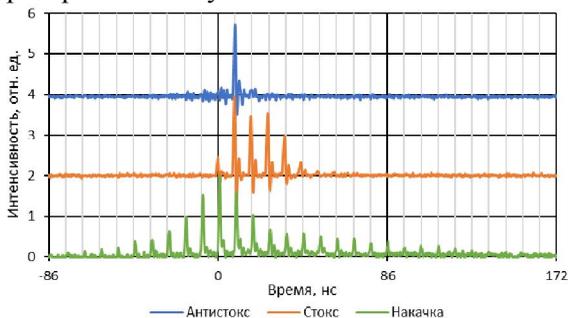


Рис. 2. Осциллограммы выходного излучения

Подобный результат объясняется тем, что генерация антистоксова излучения происходит параметрически только в присутствии излучения накачки и стокса. Однако эффективное внутрирезонаторное ВКР приводит к истощению заднего фронта цуга накачки, таким образом область пространственного пересечения накачки и стокса в ВКР-среде сужается. Подобный эффект уже наблюдался нами ранее [2] в режиме модуляции добротности, и впервые демонстрируется в режиме синхронизации мод.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Сметанину С.Н. и Папашвили А.Г. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов. Работа выполнена при поддержке грантом РФФ № 22-22-00708.

1. Smetanin S.N., Jelínek M., Kubeček V., et al. J. Appl. Phys. B, 2016, **122**, 260.
2. Smetanin S.N., Jelínek M., Tereshchenko D.P., et al. Crystals, 2021, **11**(1), 19.

Сравнение параметров импульсной генерации в гантелевидном и кольцевом резонаторах гольмиевого волоконного лазера

**Филатова С.А.¹, Камынин В.А.¹,
Хабушев Э.М.², Красников Д.В.²**

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

2- Сколковский институт науки и технологий, Москва

E-mail: filatova@kapella.gpi.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-26-28

Особый интерес наблюдается к лазерам ультракоротких импульсов (УКИ), работающим в спектральном диапазоне 2–3.5 мкм, в связи с широким спектром их возможных применений, например в спектроскопии, газоанализе, обработке материалов, лазерной хирургии, биодиагностике и т. д. [1]. Одной из перспективных активных сред для таких источников излучения являются волокна, легированные ионами гольмия (Ho), благодаря их широкому спектру усиления 2–2.2 мкм. Поэтому в последние годы интенсивно исследуются гольмиевые волоконные лазеры, работающие в режиме синхронизации мод [2, 3].

Большинство резонаторов волоконных лазеров с синхронизацией мод содержат такие дорогостоящие и сложные оптические элементы, как изоляторы, поляризаторы, светоделители, циркуляторы и т. д. Однако для дальнейшего использования лазеров УКИ в качестве задающих генераторов или в сложных гибридных системах схема лазера должна быть упрощена и должна содержать минимум элементов, которые могут повлиять на лазерную генерацию. Поэтому представляет интерес исследование волоконного лазера с простым резонатором в форме гантели [4, 5]. Данная работа посвящена сравнению параметров и эффективности генерации ультракоротких импульсов в различных типах резонаторов (гантелевидных и кольцевых) и упрощению схемы гольмиевого волоконного лазера.

Схемы экспериментальных установок гольмиевого волоконного лазера с различными типами резонаторов показаны на

Рис. 1. Резонаторы лазера состояли из 2-метрового волокна, легированного ионами Ho^{3+} , волоконных ответвителей, контроллеров поляризации (КП), разъемов FC/APC с насыщающимся поглотителем, одномодового волокна (SMF) и изолятора (ИЗО) в случае кольцевого резонатора. Накачка лазеров осуществлялась непрерывным иттербиевым (Yb) волоконным лазером на длине волны 1130 нм через волоконный мультиплексор 1125/2100 нм. В качестве насыщающегося поглотителя для реализации синхронизации мод были использованы одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ). Длина гантелевидного резонатора составляла около 8.6 м, что соответствовало частоте следования импульсов около 12 МГц, а длина кольцевого резонатора компенсировалась одномодовым волокном для получения той же частоты следования и составляла около 17.3 м.

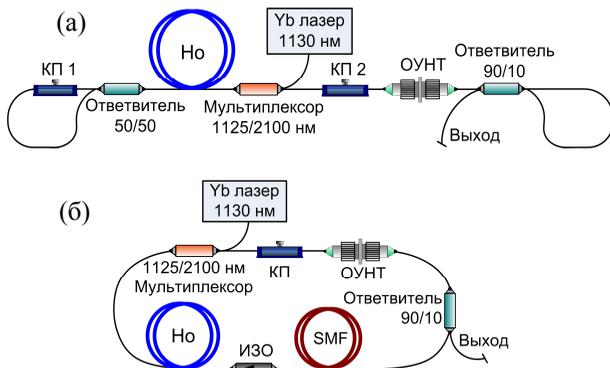


Рис. 1. Оптическая схема
гольмиевого волоконного лазера с синхронизацией мод
с гантелевидным (а) и кольцевым (б) резонатором.

Предложенная в данной работе гантелевидная конфигурация резонатора позволила снизить порог генерации и повысить эффективность генерации по сравнению с гольмиевым волоконным лазером, использующим кольцевую конфигурацию резонатора. Помимо упрощения схемы лазера, были достигнуты стабильность и повторяемость параметров лазерного излучения ($\lambda_c = 2076$ нм, $P_{\text{avg}} = 7$ мВт, $\tau = 1.3$ пс, $E = 0.6$ нДж).

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. Гладушу Ю.Г., д.т.н. Насибулину А.Г. за предоставление насыщающегося

поглотителя, а также д.ф.-м.н. Цветкову В.Б. за обсуждение результатов.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых-кандидатов наук МК-3465.2022.1.2.

1. Kirsch D.C., Chen S., Sidharthan R., et al. J. Appl. Phys. 2020, **128**(18), 180906.
2. Pawliszewska M., Dużyńska A., Zdrojek M., et al. Opt. exp. 2019, **27**(8), 11361–11369.
3. Filatova S.A., Kamynin V.A., Arutyunyan N.R., et al. Quantum Electr. 2018, **48**(12), 1113–1117.
4. Chen H., Chen S.P., Jiang Z.F., et al. Opt. Lett. 2016, **41**(18), 4210–4213.
5. Majumder D., Chowdhury S.D., Pal M., et al. In The European Conference on Lasers and Electro-Optics (p. cj_p_11), (2019, June).

КВАНТОВАЯ МАКРОФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

Поверхностная проводимость в топологическом Кондо изоляторе SmB_6

Журкин В.С., Азаревич А.Н., Кудрявцев О.С.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: dok5555@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-29-31

Гексаборид самария является классической системой с сильными электронными корреляциями, в которой состояния ионов самария с разным числом $4f$ -электронов ($4f^n$ и $4f^{n-1}$) оказываются вырожденными [1]. Нецелочисленная валентность иона самария (для SmB_6 $\nu \approx 2.6$ [2]) приводит к частичной делокализации $4f$ -состояний и флуктуациям магнитного момента. Гибридизация локализованных $4f$ - и зонных $5d$ -электронов приводит к открытию щели в зонном спектре SmB_6 ($\epsilon_g \approx 19$ мэВ [3]), что позволяет отнести это соединение к классу коррелированных узкозонных полупроводников с аномально высокими значениями эффективных масс электронов ($\sim 30m_0$) и дырок ($\sim 1500m_0$) [4–5].

Сильные $4f$ - $5d$ -электронные корреляции определяют ряд аномалий транспортных свойств гексаборида самария, в частности, «насыщение» удельного сопротивления ($\rho \sim 10 \div 100$ Ом·см), регистрируемое при $T < 5$ К для всех монокристаллов независимо от способа их получения. Согласно модели коррелированного топологического изолятора (КТИ) [6], такая конечная проводимость обусловлена поверхностными электронами с дираковским спектром, возникающими из-за нетривиальной топологии зонной структуры SmB_6 (соответствующий Z_2 инвариант (1;111) [6]). Доминирующий вклад поверхностной проводимости при низких температурах подтверждают данные фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением [7–8] и эффекты нелокальной проводимости, проявляющиеся при изменении геометрии токовых путей при

переходе от трехмерного к двумерному режиму электронного транспорта [9–10]. Однако направленного исследования параметров поверхностных состояний и их эволюции под влиянием дефектов, инициированных различной (абразивной, химической, плазменной и пр.) обработкой, для полярных/неполярных поверхностей SmB_6 [11–12] до настоящего времени не проводилось.

В работе выполнено исследование гальваномагнитных свойств образцов SmB_6 с поверхностями, ориентированными по различным кристаллографическим плоскостям (100), (110). Образцы вырезаны из одного монокристалла, выращенного методом зонной плавки с тремя проходами зоны. Обработка поверхности осуществлялась при помощи полировки на алмазном абразиве, контроль качества поверхности выполнялся на электронном микроскопе JSM-5910LV. Удельное сопротивление и эффект Холла измерялись при температурах 1.8–300 К в магнитных полях до 8 Тл. Для образцов с гранями (100) и (110) был выполнен контрольный эксперимент с травлением поверхностей в водном растворе HNO_3 (2.5:5).

В работе показано, что степень полярности и способ обработки поверхности не оказывают влияния на параметры электронного транспорта в SmB_6 при $T > 8$ К. Напротив, в режиме поверхностной проводимости при $T < 5$ К полярная поверхность (100) после абразивной полировки демонстрирует значение сопротивления насыщения $\rho^{100} = 1.41$ Ом·см и значения коэффициента Холла $R_H^{100}/R_H^{111} = 0.45$ и подвижности $\mu_H \approx 2.2$ см²/Вс при $T = 2$ К, характеризующие поверхностные электроны. При этом наблюдается заметный рост значений $\rho^{100} = 14.3$ Ом·см, $R_H^{100} = 475$ см³/Кл и $\mu_H^{100} = 15.3$ см²/Вс после химического травления граней (100). Поверхность (110) после полировки демонстрирует значение сопротивления насыщения $\rho^{110} = 0.43$ Ом·см и значения коэффициента Холла $R_H^{110}/R_H^{111} = 0.47$ и подвижности $\mu_H \approx 6.7$ см²/Вс, характеризующие поверхностные электроны. При этом наблюдается заметный рост значений $\rho^{110} = 20.1$ Ом·см, $R_H^{110} = 214$ см³/Кл и $\mu_H^{110} = 11.2$ см²/Вс после химического травления граней (110).

Полученные результаты указывают на то, что параметры поверхностных состояний зависят не только от дефектов, инициированных различной обработкой поверхности, но и от типа поверхности (полярная/неполярная). Также открывается возможность эффективного управления параметрами поверхностных состояний за

счет различной обработки поверхности SmB_6 .

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда №22-22-00990, <https://rscf.ru/project/22-22-00990/>

Авторы выражают благодарность Глушкову В.В., Божко А.Д. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Хомский Д.И. УФН. 1979, **129**, 443.
2. Mizumaki M., et al. J. Phys.: Conf. Series. 2009, **176**, 012034.
3. Gorshunov B., et al. Phys. Rev. B. 1999, **59**, 1808.
4. Travaglini G., Wachter P. Phys. Rev. B. 1984, **29**, 893.
5. Sluchanko N., et al. Phys. Rev. B. 2000, **61**, 9906.
6. Dzero M., et al. Phys. Rev. Lett. 2010, **104**, 106408.
7. Neupane M., et al. Nat. Commun. 2013, **4**, 2991.
8. Xu N., et al. Phys. Rev. B. 2013, **88**, 121102.
9. Kim D.J., et al. Nature Mater. 2014, **13**, 466.
10. Gabani S., et al. Sol. St. Sci. 2015, **47**, 17.
11. Zhu Z.-H., et al. Phys. Rev. Lett. 2013, **111**, 216402.
12. Demishev S.V., et al. Sci. Rep. 2018, **8**, 7125.

Аномальный вклад в эффекте Холла в парамагнитной фазе $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$ с динамическими зарядами страйпами

Красиков К.М., Хорошилов А.Л.

Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва

E-mail: krasikokirill@yandex.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-32-34

Обычно возникновение максимума коэффициента Холла $R_H(T)$ в системах с тяжелыми фермионами связывают с переходом к когерентному режиму рассеяния носителей заряда [1–2]. Подобная особенность $R_H(T)$ наблюдается как в чистом LuV_{12} [3], так и в твердых растворах замещения $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$ с переходом в фазу каркасного стекла при $T^* \sim 60$ К (см., например, кривую для $\mathbf{H} \parallel [001]$ на рис. 1).

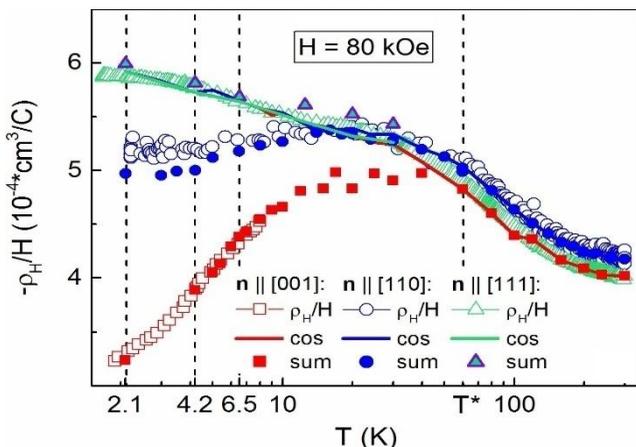


Рис. 1. Температурная зависимость приведённого холловского сопротивления $\rho_H(T)/H$ для направлений $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n} \parallel [001]$, $[110]$ и $[111]$ в $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$.

Экспериментальные значения ρ_H/H , суммы $\rho_{H0}/H + \rho_{Han}/H$ и приведенных амплитуд гармонического вклада $\cos(\varphi) = \rho_{H0}/H$ показаны соответственно незалитыми и залитыми символами и линиями.

С целью выяснения природы указанной холловской аномалии в работе в широком интервале температур $T = (1.9\text{--}300)$ К в магнитном поле до 80 кЭ методом вращения образца были выполнены измерения удельного и холловского сопротивления для набора монокристаллических образцов $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$ высокого качества с одинаковыми токовыми ориентациями $\mathbf{J} \parallel [110]$, но разными нормальными к образцам ($\mathbf{H} \parallel \mathbf{n} \parallel [001], [110], [111]$ и $[112]$).

Полученные в результате анализа кривые нормированного холловского сопротивления приведены на рис. 2.

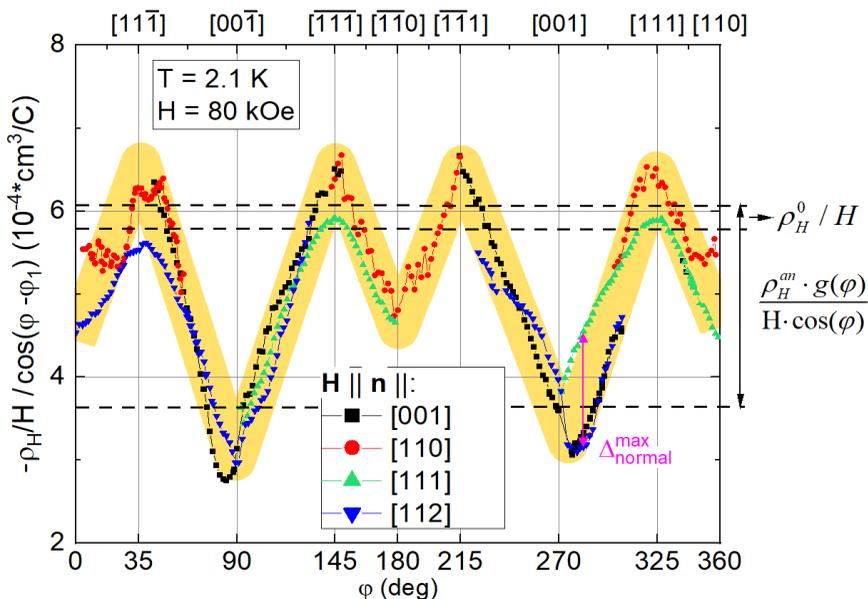


Рис. 2. Нормированная угловая зависимость холловского сопротивления $\rho_H(\varphi)/(H \cdot \cos(\varphi + \varphi_N))$ для 4-х образцов с разными нормальными к поверхности. Жёлтая заливка указывает на общую область для всех направлений и определяет аномальную компоненту.

Измерения угловых кривых холловского сопротивления и магнетосопротивления при вращении вектора \mathbf{H} в плоскости (110) , перпендикулярной направлению *страйнов* в системе, позволили восстановить угловую зависимость аномального анизотропного положительного вклада, связанного с рассеянием носителей заряда на динамических зарядовых *страйнах*.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 22-22-

00243.

1. Hadzic-Leroux M., Hamzić A., Fert A., et al. Europhys. Lett. 1986, **1**(11), 579–584.
2. Coleman R.V., Drake B., Hansma P.K., and Slough G. Phys. Rev. Lett. 1985, **55**(4), 394–397.
3. Sluchanko N. et al., Phys. Rev. B. 2021, **103**(3), 035117(17).

Деградация ПВХ при термо- и УФ-воздействиях: данные спектроскопии КР

Кузнецов С.М.¹, Годяева М.М.^{2,3}

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

2- Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

*3- Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Москва*

E-mail: kuznetsovsm@kapella.gpi.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-35-37

Поливинилхлорид (ПВХ, $[-C_2H_3Cl-]_n$) — полимер, широко применяемый в различных областях человеческой деятельности: от производства бытовых товаров и изоляционных кабелей до изготовления матриц оптических сенсоров и создания новых функциональных материалов на основе ПВХ.

ПВХ сильно подвержен деградации, и при нагреве или облучении ультрафиолетовым (УФ) излучением в его структуре формируются полиеновые последовательности $(-C=C-)_n$, влияющие на оптические, изоляционные и другие свойства полимера.

В работе исследуются спектры комбинационного рассеяния (КР) света плёнок ПВХ, деградированных в различных условиях:

- нагрев при 65 °С в течение 10 и 30 минут;
- нагрев при 120 °С в течение 3 и 20 минут;
- УФ-облучение ($\lambda = 365$ нм) в течение 13, 49 и 55 часов.

Спектры КР регистрировались при возбуждении излучением с длиной волны 532 нм в геометрии рассеяния на 180° со спектральным разрешением 1.5 cm^{-1} .

На рис. 1 представлены спектры КР исследуемых плёнок ПВХ в диапазоне валентных колебаний C=C связей.

Обнаружено, что в зависимости от условий деградации и предыстории приготовления образцов можно наблюдать две стадии образования полиенов в ПВХ.

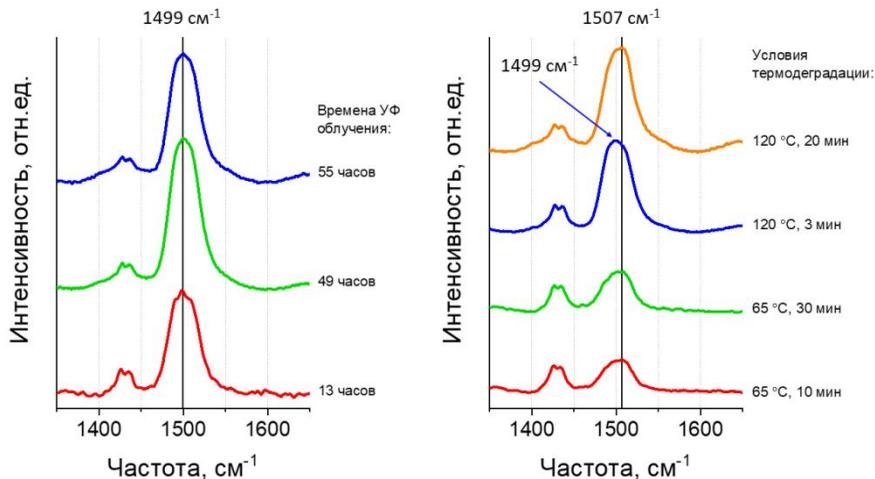


Рис. 1. Экспериментальные спектры КР образцов ПВХ, деградированных в различных условиях, в области валентных колебаний С=C связей в полиенах.

На первой стадии, в случае УФ-облучения или деградации при температуре 65 °С положение максимума полосы, отвечающей валентным колебаниям С=C связей в полиеновых последовательностях различной длины (выраженной в количестве С=C связей), не изменяется с увеличением времени воздействия. В спектрах при этом наблюдается общий рост интенсивности этой полосы. Поскольку интегральная интенсивность этой полосы пропорциональна количеству образованных полиеновых последовательностей, можно предположить, что при таких условиях деградации происходит формирование полиенов без существенных изменений в распределении их по длине.

Обнаружено, что на второй стадии, в случае термодегградации при температуре 120 °С, близкой к температуре плавления ПВХ, при увеличении времени нагрева происходит сдвиг максимума полосы валентных колебаний С=C связей на 8 см⁻¹. При этом также увеличивается её интегральная интенсивность. Поскольку положение максимума этой полосы связано с длиной полиеновых последовательностей, можно заключить, что на второй стадии не только продолжается образование новых полиенов, но и наблюдается

изменение распределения их по длине. Это наблюдение указывает на сложный процесс термического разложения.

Таким образом, в результате анализа полученных спектров КР были выделены две стадии процесса образования полиенов в ПВХ при его деградации: первая стадия включает рост содержания полиенов без заметных изменений в распределении их по длине, на второй стадии наблюдается как увеличение содержания полиенов, так и изменение распределения их по длине.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-32-90209 Аспиранты.

1. Kosińska A., Jagielski J., Wilczopolska M., et al. Surf. Coatings Technol. 2020, **388**, 125562.
2. Ludwig V., Da Costa Ludwig Z.M., Rodrigues M.M., et al. Vib. Spectrosc. 2018, **98**, 134–138.
3. Saleh S.M., Alminderej F.M., Ali R., et al. Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc. 2020, **229**, 117971
4. Al Salloum H., Saunier J., Tfayli A., et al. Mater. Sci. Eng. C. 2016, **61**, 56–62.
5. Yousif E., Hasan A. J. Taibah Univ. Sci. 2015, **9**, 421–448.
6. Hillemans J.P.H.M., Colemonts C.M.C.J., Meier R.J., et al. Polym. Degrad. Stab. 1993, **42**, 323–333.

Покрытые графеном Ni-иглы для СТМ-литографии атомной точности

Миргазизова Е.Ф.^{1,2}

1- Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Москва

*2- Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва*

E-mail: emirgazizova@nsc.gpi.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-38-40

В настоящее время активно развивается наноэлектроника на основе отдельных примесных атомов в кремниевой матрице (single-atom nanoelectronics) [1], в которой используются как отдельно встроенные атомы в качестве квантовых точек, так и двумерные массивы с концентрацией, обеспечивающей переход диэлектрик-металл, для управления квантовым транспортом. Все технологические операции (в стандартном подходе планарных технологий) проводятся в контролируемых условиях сверхвысокого вакуума. В качестве резиста используются моноатомные слои адсорбата (водород [2], галогены [3]). Окна с атомно-резкими краями в резисте (маска) формируются зондом (иглой) сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Для легирования и функционализации используется адсорбция соответствующих молекул. Для запечатывания схемы применяется низкотемпературная гомоэпитаксия. Подложкой является грань (100).

Для воспроизводимого технологического воздействия на поверхность твёрдого тела зондом СТМ необходимо иметь достаточно инертную и прочную поверхность острия зонда. Как показывает опыт, острие W- или Pt/Rh-игл, обычно применяемых в СТМ, в режиме туннельного контакта может менять своё состояние при подаче импульсного напряжения, что приводит к плохо воспроизводимым результатам СТМ-литографии кремния [4, 5]. В данной работе представлены методы создания и контроля СТМ-игл, покрытых монослоем углерода. Использованы иглы из чистой (99.98 %) никелевой проволоки, на поверхности которых реализован термопрограммируемый рост графена (Gr) [6]. Критерием наличия графена на острие Ni-иглы является специфическая плотность

электронных состояний, проявляющаяся в спектрах дифференциальной проводимости dI_i/dU_i при туннелировании. Принимая во внимание, что dI_i/dU_i определяется плотностью электронных состояний обоих контактов, в качестве второго контакта выбрана грань Cu(100), имеющая постоянную плотность состояний вблизи энергии Ферми (E_F), ± 1 эВ [7]. Условия синтеза графена: доза пропилена 500–1000 Ленгмюр при комнатной температуре с последующим отжигом при 500 °С в течение 3–4 часов. Измерения и технологические процедуры проведены в сверхвысоковакуумной установке, оснащенной электронным жеке-спектрометром, дифрактометром медленных электронов и СТМ GPI-300 [8], при давлении остаточных газов менее $6 \cdot 10^{-11}$ Торр.

На рис. 1 приведена кривая дифференциальной проводимости туннельного контакта иглы с углеродным покрытием и поверхности Cu(100) [Ni/C tip–Cu(100)]. Данная зависимость близка к аналогичной кривой для контакта W tip–Gr/Ni(111), полученной нами в эксперименте (у W-иглы постоянная плотность электронных состояний в окрестности E_F), и не противоречит данным ФЭСУР (фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением) для поверхности Gr/Ni(111). На примере Cu(100) (вставка к рис. 1) подтверждена способность Ni/C-иглы получать атомное разрешение на поверхности металлов. В докладе будут обсуждены детали эксперимента и доказательства наличия графена на острие Ni-иглы.

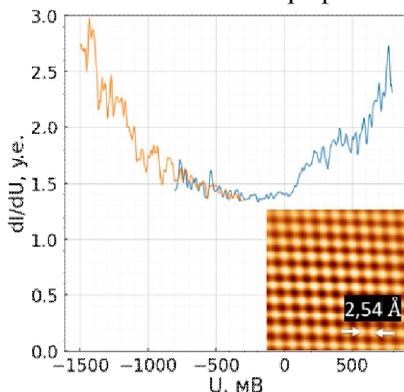


Рис. 1. Кривая дифференциальной проводимости поверхности Cu(100), снятая иглой с углеродным покрытием.
Вставка: СТМ-изображение (25×25 Å, $I=0.8$ нА, $U = -6.64$ мВ)

поверхности Cu(100)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-12-00299). Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Ельцову К.Н. и к.ф.-м.н. Павловой Т.В. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. E. Prati, T. Shinada (Eds.), Single- atom nanoelectronics, first ed., Pan Stanford Publishing Pte Ltd, Singapore, 2000.
2. Hamilton A.R., Klochan O., Danneau R., et al. Int. J. Nanotechnol. 2008, **5**(2/3), 352–369.
3. Pavlova T.V., Kovalenko S.L., Eltsov K.N. Appl. Surf. Sci. 2020, **509**, 145235.
4. Rashidi M., Wolkov R.A. ACS Nano. 2018, **12**, 5185–5189.
5. Pavlova T.V., Shevlyuga V.M. Andryushechkin B.V. et al. Appl. Surf. Sci. 2022, **591**, 153080.
6. Коваленко С.Л., Павлова Т.В., Андрюшечкин Б.В. и др. Письма ЖЭТФ. 2017, **105**(3), 170–174.
7. Baldacchini C., Chiodo L., Allegretti F. et al. Phys. Rev. B. 2003, **68**, 195109.
8. <http://sigmascan.ru/index.php/ru/menu-uhvstm>
9. Varykhalov A., Sánchez-Barriga J., Shikin A.M., et al. Phys. Rev. Lett. 2008, **101**, 157601.

Магнитные свойства Ho-лангасита

Тихановский А.Ю., Кузьменко А.М.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: tikhanovskii@phystech.edu

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-41-43

Семейство соединений лангаситов ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$) известно достаточно давно и привлекло повышенное внимание благодаря проявлению пьезоэлектрических свойств. Редкоземельные лангаситы были синтезированы достаточно давно [1], они обладают нецентросимметричной кристаллической структурой (пространственная группа $P321$) и привлекли внимание благодаря проявлению нелинейных оптических и пьезоэлектрических свойств. Одним из таких соединений является $(\text{La}_{1-x}\text{Ho}_x)_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, в котором проявляются необычные магнитные и магнитоэлектрические свойства [2–3]. Нами выполнено экспериментальное исследование магнитных свойств Ho-лангасита с концентрацией Ho $x \sim 1.56\%$ и 4.55% , а также предложено их теоретическое описание.

Магнитные ионы Ho^{3+} занимают три низкосимметричные позиции симметрии C_2 , с локальной осью, совпадающей с одной из трех кристаллографических осей 2-го порядка (a , b , $-a-b$), и остаются в парамагнитном состоянии вплоть до низких температур. Кристаллическое поле симметрии C_2 расщепляет основной мультиплет 5I_8 , на $2J+1 = 17$ синглетов. Магнитные свойства иона Ho^{3+} в лангасите, в основном, определяются двумя нижними близко расположенными энергетическими уровнями (квазидублет с расщеплением $\Delta_{cf} \approx 3$ К), хорошо отделенными от возбужденных состояний мультиплета, что обуславливает изинговское поведение магнитных ионов. Это соответствует поведению кривых намагничивания (Рис. 1), насыщение которых при низких температурах происходит в полях ~ 1 Тл (Рис. 1). Линейный рост намагниченности в области насыщения связан с примешиванием возбужденных состояний (вклад Ван Флека).

Для описания анизотропии магнитных свойств $\text{Ho}_x\text{La}_{3-x}\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ нами предложена модель, учитывающая нарушение

локальной симметрии, приводящее к отклонению изинговских осей от разрешенных симметрией C_2 направлений. Изначально неискаженные изинговские оси иона Ho^{3+} расположены в плоскости b^*c и ориентированы под углами 120° в трех неэквивалентных позициях. Особенности кристаллической структуры, а именно случайное распределение Ga и Si, приводят к искажению кристаллического поля и отклонению локальных (изинговских) осей намагничивания от плоскости b^*c , что позволяет корректно описать кривую намагничивания в поле $\text{H}||a$ (Рис. 1). Таким образом, магнитная подсистема включает в среднем 6 локальных позиций с соответствующими осями намагничивания. Это позволяет объяснить угловую зависимость намагниченности при вращении поля $\text{H} = 5 \text{ Тл}$ в плоскости bc , которая обладает тремя минимумами (Рис. 2а), соответствующими ортогональной ориентации магнитного поля относительно осей легкого намагничивания.

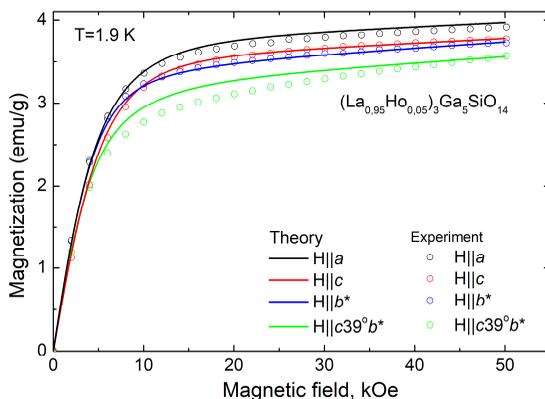


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические кривые намагничивания $(\text{La}_{0.95}\text{Ho}_{0.05})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ при температуре $T = 1.9 \text{ K}$ в магнитном поле $\text{H}||a$, $\text{H}||b^*$, $\text{H}||c$ и $\text{H}||c39^\circ b^*$ (последнее соответствует наименьшему значению намагниченности).

Для описания угловых зависимостей намагниченности (Рис. 2 а–с) мы также учли случайный характер отклонения изинговских осей от наиболее вероятных значений, описываемый распределением Гаусса для сферических углов $\varphi = \arcsin(\mu_{b^*}/(\mu_a^2 + \mu_{b^*}^2))$ и $\theta = \arccos(\mu_c/\mu_0)$ с дисперсией $\sigma_\varphi = 8^\circ$ и $\sigma_\theta = 14^\circ$. Мы также учли отклонение от чисто изинговского поведения иона в области насыщения, описываемое во втором порядке теории

возмущений.

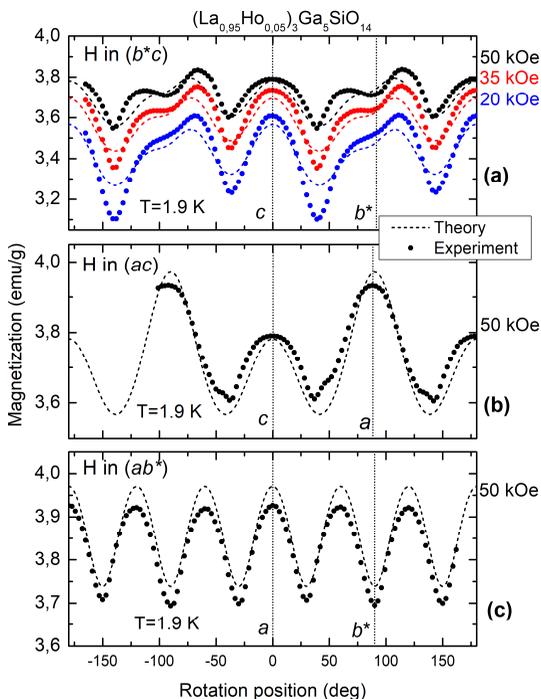


Рис. 2. Угловые зависимости намагниченности $(\text{La}_{0.95}\text{Ho}_{0.05})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ при температуре $T = 1.9$ К и вращении поля в плоскости (а) b^*c при $H = 20, 35$ и 50 кЭ, (б) ac при $H = 50$ кЭ, (с) ab^* при $H = 50$ кЭ.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Мухину А.А. и к.ф.-м.н. Иванову В.Ю. за постановку задачи, помощь в подготовке теории и выполнении эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 22-42-05004).

1. Kaminskii A.A., Mill B.V., Silvestrova I.M. et al. Izv. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser. 1983, **47**, 1903–1909.
2. Bordet P., Gelard I., Marty K., et al. J. Phys. Condens. Matter. 2006, **18**(22), 5147–5153.
3. Weymann L., Bergen L., Kain T., et al. Npj Quantum Mater. 2020, **5**(1), 61.

Особенности влияния гостевых молекул на теплофизические и электронные свойства гидратов

Юнусов М.Б.¹, Хуснутдинов Р.М.^{1,2}

*1- Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Институт физики, Казань*

*2- Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
Ижевск*

E-mail: mukhammadbek@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-44-45

Нестехиометрические молекулярные комплексы по типу «гость-хозяин» являются сложными и малоизученными соединениями. Ярким их представителем являются природные газовые гидраты [1], состоящие из кристаллической водной решётки с полостями в форме сложных многогранников (5^{12} , $5^{12}6^2$, ...) (см. рис. 1). При термодинамических условиях ($T < 273$ К и $p > 0.5$ МПа) в присутствии молекул легких газов (CH_4 , H_2S , H_2 , N_2 , Ar, Kr, Xe, CO_2 , C_2H_6 , C_3H_8) происходят процессы нуклеации и роста газовых гидратов. Наиболее интересными как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения являются гидраты, содержащие легкие углеводороды (метан и этан). Такие системы вследствие их огромных запасов на дне океанов и в зонах вечной мерзлоты могут выступать перспективным источником топлива в будущем [2].

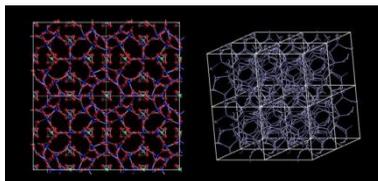


Рис. 1. Слева — 2D-проекция кристаллической решетки гидрата с содержанием метана. Справа — 3D-проекция пустой кристаллической решетки гидрата sI .

Как известно, клатратные каркасы являются термодинамически нестабильными. В то же время, присутствие молекул газа в гидратах значительно повышает их стабильность. В настоящей работе исследуются механизмы стабилизации водного каркаса гидрата молекулами газов. Полученные результаты могут способствовать

усовершенствованию технологий добычи газов из гидратов, а также развитию теоретических моделей описания клатратных соединений. Установлено, что молекулы газов (CH_4 , H_2S , H_2 , N_2 , Ar , Kr , Xe , CO_2 , C_2H_6 , C_3H_8) в решётке гидрата с полостями 5^{12} , $5^{12}6^2$ приводят к их деформации и изменению радиуса до 0.23%. Таким образом, силы ван-дер-Ваальса [3] приводят к отталкиванию узлов полостей от центральной молекулы газа и предотвращают коллапс полости. Кроме того, результаты расчётов показывают, что система, представляющая собой газогидрат, является энергетически более стабильной системой, чем незаполненный гидратный каркас. Впервые были рассчитаны энергии связи для самых распространенных газов в гидратах (CH_4 , H_2S , H_2 , N_2 , Ar , Kr , Xe , CO_2 , C_2H_6 , C_3H_8) с двумя типами водных молекулярных полостей (5^{12} , $5^{12}6^2$). Для детального анализа влияния молекул газа на процессы стабилизации газового гидрата были рассчитаны плотности электронных состояний $N(E)$. Показано, что в присутствии молекулы газа в полости распределение электронной плотности смещается в сторону низких энергий, что свидетельствует о переходе кристалла в более низкоэнергетическое состояние (см. рис. 2).

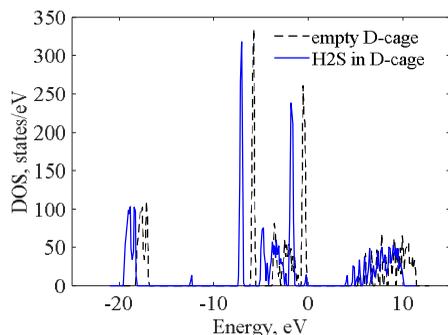


Рис. 2. Плотности электронных состояний $N(E)$ для водной полости 5^{12} (D-cage) в присутствии и отсутствии молекулы газа H_2S .

Крупномасштабные квантово-механические расчеты выполнены на вычислительном кластере

Казанского федерального университета. Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 22-22-00508).

1. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate Hydrates of Natural Gases, CRC Press, Taylor & Francis, 2007.
2. Makogon Y.F. J. Nat. Gas Sci. Eng., 2010, **2**(1), 49–59.
3. Van-der Waals J.H. Trans. Faraday Soc. 1956, **52**, 184–193.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, АКТИВНЫЕ СРЕДЫ И НАНОСТРУКТУРЫ

Получение наночастиц бора методом лазерной абляции в жидкости

Айыыжы К.О.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: aiyzyhy@phystech.edu

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-46-48

В последнее время наблюдается большой интерес к получению наночастиц бора, вызванный возможностью их применения в технологиях синтеза топлив и в новых радиофармацевтических препаратах. Бор превосходит углеводороды по объёмной и по удельной массовой теплоте сгорания. Эти качества, наряду с малой токсичностью наночастиц бора и возможностью их промышленного производства, позволяют рассматривать суспензии наночастиц бора в углеводородах в качестве перспективных энергоёмких композиционных топлив. Исследования показали, что добавка наночастиц бора в жидкое углеводородное топливо позволяет увеличить температуру пламени его горения на 15 % [1, 2]. Промышленные порошки бора имеют субмикронные размеры, а скорость горения пропорциональна площади удельной поверхности частиц, поэтому для эффективного сгорания размер наночастиц должен быть как можно меньше. Также уменьшение размера частиц бора приводит к увеличению полноты сгорания и расширению пределов воспламенения.

Другой важной областью применения наночастиц бора является бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) раковых клеток [3]. Установлено, что наночастицы бора как основа радиофармацевтических лечебных препаратов позволяют снизить долю выживших раковых клеток до 5–10 %. В технологической практике получение частиц элементного бора в основном осуществляют методами химического осаждения из газовой фазы. Следует отметить, что эти методы позволяют получать порошки элементного бора с широким распределением по размерам (от 0.5 до

20 мкм). Получение частиц чистого бора малого размера позволит заметно увеличить эффективность БНЗТ за счёт увеличения удельной поверхности частиц. Кроме того, наночастицы бора должны быть биосовместимы. Таким образом, целью работы было получение биосовместимых наночастиц бора размером менее 100 нм.

Вышеперечисленные требования к наночастицам возможно удовлетворить с использованием метода лазерной абляции в жидкости и последующей фрагментации полученного коллоида. Лазерное излучение волоконного иттербиевого лазера мощностью 20 Вт с длиной волны 1060–1070 нм, частотой следования импульсов 20 кГц и длительностью импульса 200 нс фокусировалось с помощью F-Theta объектива ($F=204$ мм) на поверхность мишени спечённого бора, находящуюся в проточной кювете, заполненной изопропиловым спиртом. Лазерная абляция мишени приводит к образованию относительно крупных субмикронных частиц бора из-за высокой плотности энергии лазерного пучка. Дальнейшая лазерная фрагментация путём повторного воздействия лазерного излучения на полученный коллоидный раствор наночастиц бора в течение 135 минут приводила к образованию наночастиц с распределением по размерам в диапазоне 7–60 нм (рис. 1а). Исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии подтверждают данные, полученные с помощью дисковой центрифуги. На рис. 1б представлена морфология наночастиц бора. Анализ элементного состава частицы показывает однородное содержание углерода в центральной части частицы и его увеличение по краям. Это свидетельствует об углеродной оболочке наночастицы. Период кристаллографических плоскостей оболочки составляет 0.34 нм, что соответствует графитизированному углероду. Наличие углеродной оболочки на наночастицах бора дает преимущество для нанокompозитных углеводородных топлив, поскольку углерод может служить воспламенителем горения бора. Также углеродная оболочка вокруг бора может служить в качестве защитного химически стойкого, прочного и биосовместимого слоя для применения в БНЗТ. Согласно базе данных рентгеновская дифрактограмма исходной мишени соответствует кристаллической структуре, состоящей из 314 единиц ячеек V_7 . А кристаллографическая структура полученных наночастиц бора претерпевает аллотропную модификацию и состоит из ромбоэдрического бора и центросимметричного V_7 .

Таким образом, наночастицы бора, полученные методом лазерной абляции и фрагментации в изопропанол, являются перспективными кандидатами как для добавки в композитное топливо, так и для использования в БНЗТ.

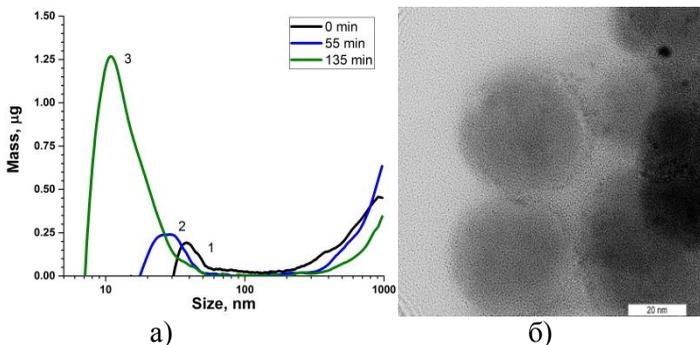


Рис. 1. Зависимость распределения размера наночастиц бора по размерам при различном времени лазерной фрагментации: 0(1), 55(2) и 135(3) мин (а). Вид наночастиц после фрагментации в просвечивающий электронный микроскоп (б).

Работа поддержана грантом Президента РФ № МД-3790.2021.1.2. Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Шафееву Г.А., д.ф.-м.н. Барминой Е.В., к.ф.-м.н. Ракову И.И. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов, а также центру коллективного пользования ИОФ РАН им. А.М. Прохорова за ПЭМ-изображения наночастиц и данные рентгеноструктурного анализа.

1. Karmakar S., Acharya S., Dooley K.M. Journal of Propulsion and Power. 2013, **28**, 707–718.
2. Barmina E.V., Zhilnikova M.I., Aiyzhy K.O., et al. Doklady Physics. 2022, **67**(2), 39–43.
3. Dymova M., Taskaev S., Richter V., Kuligina E. Canc. Com. 2020, **40**, 406–421.

Влияние фазового состава на радиопоглощающие свойства твердых растворов $\text{PbTi}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$ на микрополосковой линии в СВЧ-диапазоне

Астафьев П.А., Андрушин К.П., Саху С.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

E-mail: l.6.e.9.w.4.a.9.p@yandex.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-49-51

Одними из перспективных материалов для применения в СВЧ-резонаторах, фильтрах, аттенюаторах и фазовращателях являются твёрдые растворы (ТР) на основе PbTiO_3 и PbZrO_3 (PZT) [1–3]. Для корректного описания подобных многокомпонентных систем необходимо полное исследование их свойств в широком диапазоне концентраций и частот в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации устройств на их основе.

В рамках данной работы было проведено исследование радиопоглощающих свойств ТР системы PZT в широком диапазоне концентраций компонентов с использованием микрополосковой линии (МПЛ).

Способ получения керамики, рентгенографические исследования и измерения электрофизических параметров описаны в работах [4, 5]. Образцы были выполнены в форме цилиндров диаметром 12 и высотой 3 мм.

Радиофизические измерения выполнялись с помощью векторного анализатора цепей (VNA) P9375A «Keysight» в измерительной ячейке, представляющей собой прямолинейный отрезок МПЛ [6, 7].

Исследование показало, что увеличение диэлектрической проницаемости материала в морфотропной области приводит к смещению полосы поглощения в область более низких частот (Рис. 1).

Подобное наблюдалось в многокомпонентных системах, исследованных нами ранее [7], однако в данном случае полоса поглощения не имеет уширений. Кроме того, смещение полосы поглощения коррелирует с изменением диэлектрической проницаемости слабо, что может быть связано с различием относительной плотности образцов [5] или несовершенством механической обработки.

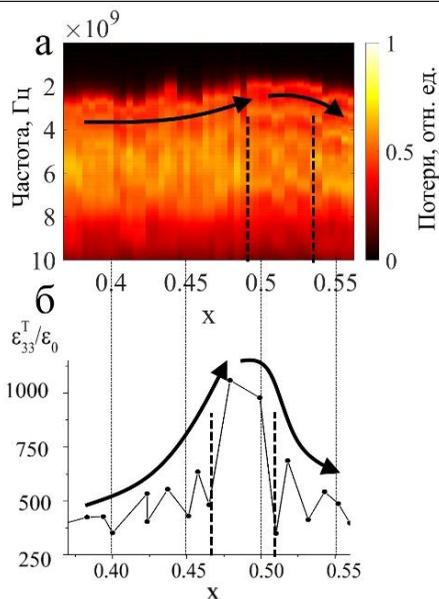


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения образцов от частоты и концентрации (а) и зависимость относительной диэлектрической проницаемости от концентрации (б). Стрелками показана динамика изменения параметров, пунктиром выделены особенности, возникающие в морфотропных областях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № (0852-2020-0032)/(БАЗ0110/20-3-07ИФ)).

1. Ming Z., Usami T., Taniyama T. *NPG Asia Materials*. 2021, **13**(1), 1–9.
2. Ümit Ö., Alivov Y., Morkoç H. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2009, **20**(10), 911–952.
3. Xi Y., et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020, **501**, 166410.
4. Andryushina I.N., et al. *Ceramics International*. 2013, **39**(1), 753–761.
5. Andryushina I.N., et al. *Ceramics International*. 2013, **39**(7), 7635–7640.
6. Reizenkind Y.A., Kleshchenkov A.B., Lerer A.M., Noikin Y.M. *Proceedings of the International Symposium: Physics of Lead-Free*

Piezoactive and Related Materials. Modeling of Eco-Systems (Analysis of Current State and Prospects of Development). 2021, **2**, 280.

7. Astafev P., et al. Crystals. 2022, **12**(4), 551.

Коротковолновый сдвиг максимума фотолюминесценции нанотетраподов теллурида кадмия с наконечниками из селенида кадмия

Гаврилов С.Ю.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, Москва.*

E-mail: logbook1@yandex.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-52-54

В настоящей работе были исследованы нелинейно-оптические свойства коллоидных растворов полупроводниковых нанотетраподов на основе теллурида кадмия с отростками селенида кадмия на продолжениях ножек. Квантово-размерный эффект приводит к дискретизации электронных и дырочных уровней в рассматриваемых нанокристаллах (тетраподных квантовых точках). Особое внимание в исследовании уделено явлению коротковолнового сдвига фотолюминесценции, связанной с непрямым экситонным переходом в наноструктурах CdTe/CdSe.

Полупроводниковые нанотетраподы могут быть использованы для биологической визуализации, создания активных сред лазеров, модуляторов добротности, светодиодов [1]. Гетероструктуры второго типа на основе нанотетраподов особенно перспективны для создания солнечных элементов из-за эффекта фотоэлектрического разделения зарядов [2, 3].

Для установления особенностей фотолюминесценции нанотетраподов был применен метод накачки и зондирования. Накачка была осуществлена на третьей гармонике неодимового YAP-лазера (360 нм), зондирование — люминесценцией красителей в оптическом диапазоне (от 500 до 800 нм).

Измеренные спектры фотолюминесценции характеризуются тремя максимумами (рис. 1). Первые два максимума фотолюминесценции относятся к прямым экситонным переходам в компонентах CdSe и CdTe. Длины волн экситонных переходов исследуемых нанотетраподов определены исходя из анализа литературы [4]. Максимум в интервале длин волн от 745 до 776 нм соответствует непрямому экситонному переходу. Для непрямого перехода обнаружен коротковолновый сдвиг максимума ФЛ при

увеличении интенсивности оптической накачки. Коротковолновый сдвиг объясняется зависимостью радиуса экситона от экситонной плотности. Увеличение интенсивности накачки вызывает рост экситонной плотности в гетероструктуре, что приводит к заполнению фазового пространства экситонов, сопровождающемуся увеличением радиуса экситона. Увеличение радиуса экситона приводит к уменьшению энергии связи экситона и увеличению энергии непрямого перехода.

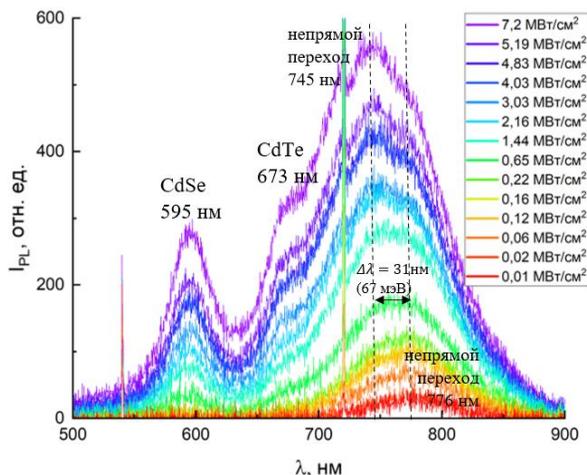


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции нанотетрапедов CdTe/CdSe при различных интенсивностях накачки

Коротковолновый сдвиг ФЛ при нерезонансном возбуждении экситонов в нанотетраподах CdTe/CdSe составил ≈ 67 мэВ, что вдвое меньше энергии связи экситона (127 мэВ)[4] (см. формулу 1). Данная особенность связана с возникновением локального нагрева нанокристаллов, приводящего к красному сдвигу электронных и дырочных уровней.

$$E_{exc}^{1D} = \frac{e^2}{\sqrt{\epsilon_s \epsilon_l} d} \sqrt{\log\left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_l}\right)}, \quad (1)$$

где d — диаметр ножки тетрапода, e — заряд электрона, ϵ_s — диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_l — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Была построена зависимость полуширины пиков ФЛ прямого

экситонного перехода в компоненте CdSe от интенсивности оптической накачки (рис. 2). В пределах погрешностей она имеет линейный характер роста. Уширение пика ФЛ может указывать на экситон-фононное взаимодействие, приводящее к нагреву нанотетраподов.

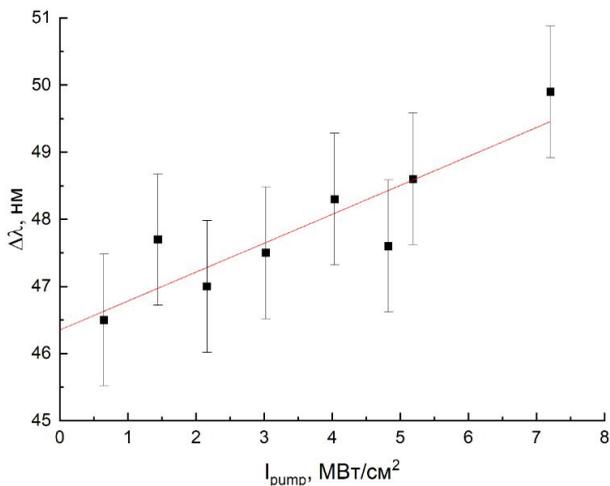


Рис. 2. Зависимость ширины ФЛ на половине максимума интенсивности прямого основного экситонного перехода в CdSe от интенсивности накачки на 595 нм

Выражаю благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Смирнову А.М. и к.ф.-м.н. Козловой М.В. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Bera D., et al. *Materials*. 2010. **3**(4): 2260–2345.
2. Nideep T.K., Ramya M., and Kailasnath M. *Superlattices and Microstructures*. 2020, **141**, 106477.
3. Lee H., et al. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011, **95**(2), 446–452.
4. Golinskaya A.D., et al. *Results in Physics*. 2021, **27**, 104488.

Расчет линии ликвидуса и линии стеклования сплава $\text{Ni}_{62}\text{Nb}_{38}$ для широкого диапазона давлений

Галимзянов Б.Н., Доронина М.А., Мокшин А.В.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

E-mail: bulatgnmail@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-55-56

Сплав $\text{Ni}_{62}\text{Nb}_{38}$ представляет собой превосходный конструкционный материал, обладающий высокой прочностью и хорошей аморфообразующей способностью [1]. Исследования последних десятилетий преимущественно были посвящены изучению структуры и механических свойств этого сплава при нормальных условиях. Поэтому температура ликвидуса T_l и температура стеклования T_g этого сплава достаточно точно определены при комнатной температуре и давлении 1 атм [2]. При этом до сих пор в научной литературе отсутствует информация о значениях температур T_l и T_g при более высоких давлениях. Подобного рода исследования ранее не были проведены, что также обуславливает отсутствие (p, T) фазовой диаграммы для этого сплава.

В настоящем исследовании нами впервые рассчитаны линия ликвидуса $T_l(p)$ и линия стеклования $T_g(p)$ системы $\text{Ni}_{62}\text{Nb}_{38}$ для давлений в интервале $p \in [1; 1 \cdot 10^7]$ атм. Расчеты выполнены на основе результатов моделирования молекулярной динамики, полученных с использованием вычислительного пакета Lammmps [3]. Оценка температуры ликвидуса выполнена посредством отслеживания изменения доли атомов кристаллической фазы при нагревании кристаллического образца. Температура, при которой происходит полный переход атомов из кристаллической в жидкую фазу, определялась как температура ликвидуса. Для оценки температуры стеклования были рассчитаны температурные зависимости разности потенциальной и кинетической энергий системы при охлаждении жидкого расплава. Эти зависимости характеризуются двумя линейными режимами, температура перехода между которыми соответствует температуре стеклования.

На рис. 1 представлены полученные линии $T_l(p)$ и $T_g(p)$. Как видно из этого рисунка, при давлениях ниже $\sim 1 \cdot 10^4$ атм линии ликвидуса и стеклования не зависят от величины давления. В

диапазоне давлений $p \in [1; 1 \cdot 10^7]$ атм температура ликвидуса составляет $T_l \approx 1550$ К, в то время как температура стеклования $T_g \approx 1020$ К. Найденные значения находятся в хорошем согласии с экспериментальными значениями $T_l^{(exp)} \approx 1543$ К и $T_g^{(exp)} \approx 891$ К при давлении 1 атм [4, 5].

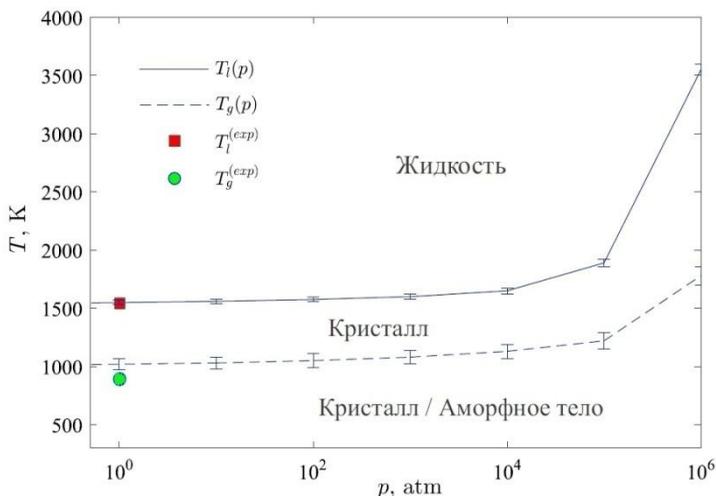


Рис. 1. Линия ликвидуса $T_l(p)$ и линия стеклования $T_g(p)$ системы $\text{Ni}_{62}\text{Nb}_{38}$. Сплошной и пунктирной линиями обозначены данные моделирования. Маркерами обозначены данные эксперимента. Для удобства температура представлена в логарифмической шкале

Работа выполнена при поддержке РФФ (№19-12-00022-П). Авторы выражают признательность Фонду развития теоретической физики и математики «Базис» (№ 20-1-2-38-1).

1. Xia L., Li W.H., Fang S.S., et al. J. Appl. Phys. 2006, **99**, 026103.
2. Okamoto H. J. Ph. Equilibria Diffus. 2008, **29**, 210.
3. Galimzyanov B.N., Doronina M.A., Mokshin A.V. J. Non-Cryst. Solids. 2021, **572**, 121102.
4. Lesz S., Dercz G. J. Therm. Anal. Calorim. 2016, **126**, 19–26.
5. Mauro N.A., Johnson M.L., Bendert J.C., et al. J. Non-Cryst. Solids. 2013, **362**, 237–245.

Изучение пленок феррониобата бария-неодима методом спектральной эллипсометрии

Жидель К.М.^{1,2}, Павленко А.В.^{1,2}

1- Федеральный исследовательский центр

Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону.

2- Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону.

E-mail: karinagidele@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-57-58

В данной работе нами представлены результаты исследования оптических параметров тонких пленок феррониобата бария-неодима ($\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$, BNFNO), выращенных на подложке $\text{MgO}(001)$ методом спектральной эллипсометрии. Пленки BNFNO обладают свойствами, потенциально интересными для практических приложений, что обуславливает интерес исследований. Анализ публикаций в научных изданиях показал, что сведений об оптических характеристиках материала данного состава не представлено.

Оптические измерения проводились с помощью спектрального эллипсометра «ЭЛЛИПС-1991» (ООО НПК «ЦНТ», Россия), работающего по статической схеме в диапазоне длин волн $\lambda = 350\text{--}1000$ нм на воздухе, при угле падения зондирующего излучения относительно нормали к поверхности $\varphi = 65^\circ$. Спектральное разрешение 2.5 нм. Время измерения одного спектра не превышало 20 с. Измерения выполнялись по четырехзонной методике. Определены эллипсометрические углы ψ и Δ , входящие в основное уравнение эллипсометрии [1]:

$$\rho = r_p / r_s = \text{tg } \Psi \exp(i\Delta), \quad (1)$$

где $\text{tg } \Psi = |r_p| / |r_s|$ — отношение комплексных коэффициентов отражения r_p и r_s , а $\Delta = \delta r_p - \delta r_s$ — относительное изменение фазы, происходящее при отражении между p - и s -компонентами.

Уравнение (1) позволяет решать прямую задачу эллипсометрии, с его помощью можно рассчитывать и анализировать поведение эллипсометрических углов для разных моделей оптических структур исходя из их материальных параметров и углов падения φ . Для расчета оптических параметров объектов применялось встроенное программное обеспечение «Спектроскан».

На рис. 1 символическими кривыми показаны измеренные

спектры эллипсометрических параметров $\Psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ для пленок $Ba_2NdFeNb_4O_{15}$ на подложке $MgO(001)$.

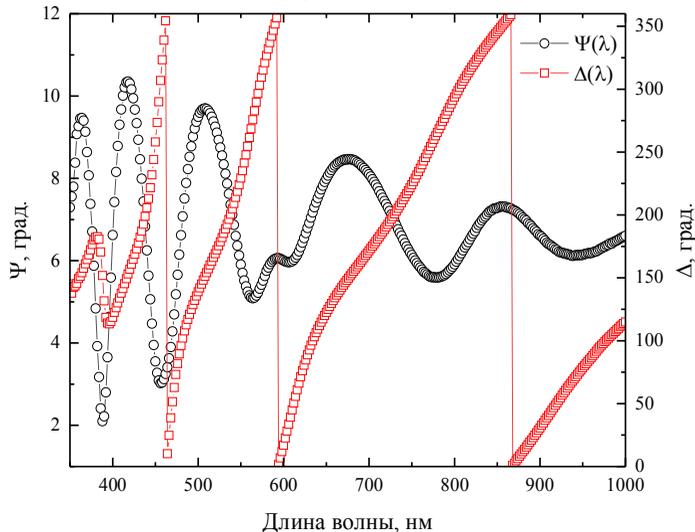


Рис. 1. Экспериментальные зависимости (символьные кривые) Ψ и Δ для угла падения зондирующего излучения $\varphi = 65^\circ$ как функция длины волны.

Таким образом, в данной работе были проанализированы спектры эллипсометрических параметров с целью установления оптической модели системы, определения толщины пленок, дисперсии показателя преломления и коэффициента экстинкции.

Использовано оборудование ЦКП «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)».

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-10180).

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика: учеб. пособ.: для вузов. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 656 с.

Квази-непрерывные характеристики генерации керамики Yb:YSAG

**Жмыхов В.Ю., Гурьев Д.А., Добрецова Е.А.,
Цветков В.С., Кузнецов С.В.**

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: Vadimzhmykhov56@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-59-61

В настоящее время оптически прозрачная керамика рассматривается как перспективная замена монокристаллическим лазерным активным средам во многих применениях [1]. Такая замена становится возможной благодаря определенному преимуществу керамики, такому как возможность высокой концентрации легирования, низкая стоимость [2], высокая однородность активного материала, относительная простота изготовления больших образцов и реализуемость многослойной структуры [3].

В данной работе мы представляем результаты исследования квазинепрерывной генерации образца 10 ат.% Yb:YSAG керамики. Керамический образец имел толщину 1 мм и не имел просветляющих покрытий. Использовался резонатор длиной 2 см, образованный двумя сферическими зеркалами, схема резонатора представлена на рис. 1.

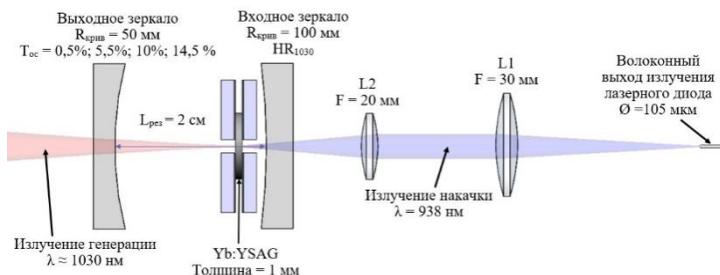


Рис. 1. Схема резонатора Yb:YSAG лазера.

Входное зеркало было высокоотражающим на длине волны генерации (≈ 1030 нм) и имело радиус кривизны $R_{\text{вх.}} = 100$ мм. В качестве выходного зеркала использовались сферические зеркала с

радиусом кривизны $R_{\text{вых.}} = 50$ мм с разными коэффициентами пропускания $T_{\text{ос}}$ (0.5, 5.5, 10, 14.5 %) на длине волны генерации. Для накачки керамики Yb:YSAG использовался лазерный диод с волоконным выходом излучения с длиной волны около 938 нм. Диаметр сердцевины волокна составлял 105 мкм. Фокусировка излучения накачки осуществлялась при помощи системы двух линз ($L1$ и $L2$ на рис. 1). Диаметр пятна накачки в активном элементе составлял примерно 100 мкм. Конфигурация резонатора и системы фокусировки излучения накачки были выбраны таким образом, чтобы обеспечить оптимальное перекрытие областей накачки и генерации.

Накачка керамики осуществлялась в квази-непрерывном режиме для того, чтобы уменьшить влияние термооптических эффектов на эффективность генерации. Длительность импульса накачки составляла 3 мс, частота повторения импульсов составляла примерно 10 Гц. Исследование выходной мощности генерации проводилось с использованием выходных зеркал с разным коэффициентом пропускания на длине волны генерации. Зависимости выходной мощности генерации от поглощенной мощности накачки представлены на рис. 2.

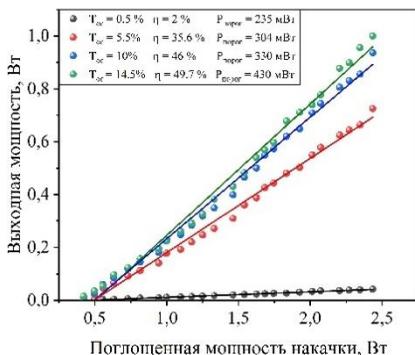


Рис. 2. Зависимости выходной мощности генерации лазера на керамике Yb:YSAG при разных коэффициентах пропускания выходного зеркала.

Максимальная выходная мощность была получена при использовании выходного зеркала с коэффициентом пропускания на длине волны генерации 14.5 % и составила 1 Вт при поглощенной мощности накачки 2.4 Вт. При этом дифференциальный КПД

составил примерно 49.7 %. Данное значение сильно отличается от максимально возможного, соответствующего значению квантового выхода в данной керамике (91 %). Такое отличие связано, главным образом, с отсутствием просветляющих покрытий на поверхностях используемого образца керамики.

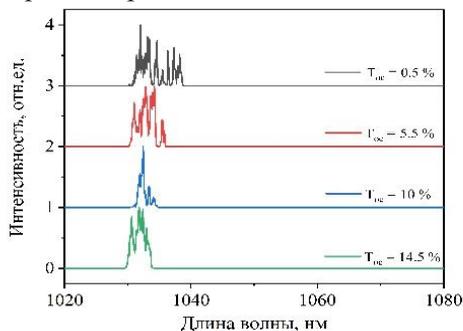


Рис. 3. Спектры лазерного излучения, измеренные при поглощенной мощности накачки 2.4 Вт.

Также были исследованы спектральные характеристики лазерного излучения при использовании разных выходных зеркалах (рис. 3). Спектр генерации мало зависел от коэффициента пропускания выходного зеркала. Однако, наблюдалось уширение спектра генерации при уменьшении коэффициента пропускания.

Для получения наилучшего результата необходимо нанесение просветляющих покрытий на образец с обеих сторон. В будущих исследованиях планируется оценить влияние состава образца (в частности, соотношения между Al^{3+} и Sc^{3+}) на спектроскопические свойства Yb^{3+} и на генерационные характеристики этого материала с целью улучшения технологии изготовления лазерной керамики.

Выражаем благодарность группе технологов: М.С. Никовой, И.С. Чикиулиной, В.А. Тарала и Д.С. Вакалову. Работа поддержана Грантом Президента Российской Федерации, №МК-72.2022.1.2

1. Kracht D., Frede M., Wilhelm R., et al. J. Opt. Express. 2005, **13**, 6212–6216.
2. Ikesue A., Kinoshita T., Kamata K., et al. J. Am. Ceram. Soc. 1995, **78**, 1033–1040.
3. Lu J., Prabhu M., Song J., et al. J. Appl. Phys. B. 2000, **71**, 469–473.

Самодиффузия воды в бесфорных протонообменных мембранах с различным соотношением гидрофильных и гидрофобных блоков

**Заворотная У.М.^{1,2,5}, Пономарев И.И.³, Волкова Ю.А.³,
Привалов А.Ф.⁴, Фогель М.⁴**

1- Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Москва

*2- Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва*

*3- Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова
Российской академии наук, Москва*

*4- Институт физики конденсированного состояния Технического
университета Дармштадта, Дармштадт*

5- Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка

E-mail: ulyanamzav@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-62-65

Топливные элементы на основе протонообменных мембран (ПОМТЭ) наиболее эффективно преобразуют химическую энергию реакции H_2-O_2 в электрическую, причем конечными продуктами являются только вода, тепло и электричество [1, 2]. В настоящее время в коммерческих ПОМТЭ широко используются протонообменные мембраны на основе перфторированного сульфополимера типа Nafion, разработанные компанией DuPont еще в 60-х годах прошлого века [3]. Несмотря на высокую эффективность этих полимеров в качестве электролитической мембраны, они имеют ряд недостатков. Одной из альтернатив являются углеводородные полимеры. Синтез и производство на их основе протонообменных мембран существенно проще и дешевле (за счет отсутствия фтора в химической структуре), чем Nafion, и они легко перерабатываются традиционными методами [4, 5].

Среди огромного разнообразия материалов из углеводородного класса особый интерес представляют сульфированные полинафтоиленимидные полимеры (далее — со-PNIS). Они отличаются высокой протонной проводимостью и сравнимыми с наиболее коммерчески успешными аналогами мощностными

характеристиками ПОМТЭ, сделанными на основе этих мембран [6].

В данной работе представлены результаты исследования коэффициентов диффузии воды в трех модификациях со-PNIS мембран (с соотношениями гидрофильных к гидрофобным блокам: 85/15, 70/30, 60/40) в температурном интервале 193–355 К. Измерения проводились методом ЯМР-диффузометрии с градиентом статического поля (СГП) в последовательности импульсов, соответствующих стимулированному эху и эху Хана [7].

Чтобы исключить затухание эха из-за спиновой релаксации и влияние таких эффектов, как перенос поляризации между подвижными и неподвижными спинами, при определении коэффициентов диффузии мы делили результаты идентичных измерений, выполненных для одной и той же резонансной частоты 173 МГц, но с разными градиентами магнитного поля ($G = 132$ Тл/м, $g = 75$ Тл/м).

$$\frac{S(t_m, \tau, G)}{S(t_m, \tau, g)} = S_0 \cdot \exp[-(\gamma t_e)^2 (G^2 - g^2) \cdot (\frac{2}{3} t_e + t_m) \cdot D_{NMR}] \quad (1)$$

Здесь S_0 – амплитуда эха, γ — гиромагнитное отношение протона, t_m , t_e — времена эволюции, G и g – градиенты магнитного поля, D_{NMR} — коэффициент диффузии.

В качестве примера на рис. 1 представлены кривые типа (1) для определения коэффициентов диффузии мембраны со-PNIS_{60/40} с пониженным содержанием гидрофильных блоков при температуре 278 К.

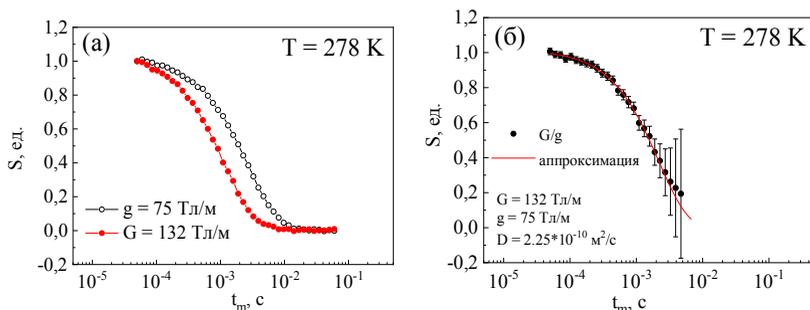


Рис. 1. Зависимости СГП для мембран со-PNIS_{60/40} при 278 К в двух градиентах магнитного поля (а), те же данные, разделенные и аппроксимированные с использованием уравнения (1) (б).

Рисунок 2 суммирует проведенные нами исследования, на нём

представлены температурные зависимости коэффициентов диффузии воды для объемной воды, Nafion 212, со-PNIS_{85/15}, со-PNIS_{70/30} и со-PNIS_{60/40} при 100% влажности окружающей среды.

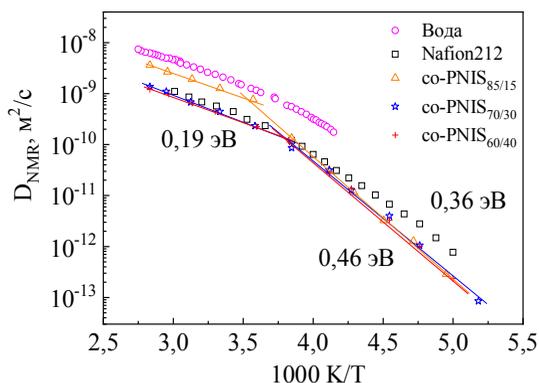


Рис. 2. Коэффициенты самодиффузии воды для объемной воды, Nafion 212, со-PNIS_{85/15}, со-PNIS_{70/30} и со-PNIS_{60/40}.

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что диффузия для всех исследованных со-PNIS мембран имеет подобный характер, демонстрируя две характерные области выше и ниже точки кроссовера ($T_{кр} = 245\text{--}265 \text{ K}$) с энергиями активации 0,19 и 0,46 эВ соответственно. Интересно отметить, что значения D_{NMR} для Nafion 212 при $T > T_{кр}$ практически в 2 раза уступают аналогичным характеристикам для со-PNIS_{85/15}. Таким образом, можно предположить, что со-PNIS_{85/15} мембрана является более эффективной при стационарных нагрузках в ПОМТЭ, чем Nafion.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант № 22-22-00005).

1. Skalski T.J.G., Adamski M., Britton B. et al. ChemSusChem. 2018, **11**, 4033.
2. Imran M.A., He G., Wu X. et al. J. Appl. Polym. Sci. 2019, **136** 47892.
3. Connolly D.J., Gresham W.F., Patent 3,282,875, 1966.
4. Leea K.H., Chua J.Y., Mohanraj V., et al. International Journal of Hydrogen Energy. 2020, **45**, 29297–29307.
5. Xu S., Adamski M., Killer M. et al. Macromolecules. 2019, **52**, 2548–2559.

-
6. Emets V.V., Ponomarev I.I., Grinberg V.A. Russ. J. Electrochem. 2017, **53**, 86–91.
 7. Chang F.I., Fujara B., Geil G. et al. J. Non-Cryst. Solid. 1994, **674**, 172–174.

Анализ влияния механических деформаций на электронные характеристики графена, осажденного на диэлектрическую подложку из дителлурида молибдена

Кулямин П.А.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: kulyamin.pavel@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-66-68

Графен вызывает большой интерес у научного сообщества с момента его экспериментальной реализации в 2004 г. [1] благодаря ряду уникальных свойств: аномально высокая подвижность носителей заряда, механическая прочность. Графен является бесщелевым полупроводником с линейным законом дисперсии носителей заряда вблизи уровня Ферми. Это означает отсутствие у данного материала запрещенной зоны, что является серьёзным препятствием для использования графена в логических и высокоскоростных коммутационных устройствах, таких как полевые транзисторы или устройства спинтроники.

В частности, один из путей получения запрещенной зоны в графене — создание на его основе сложных композитных структур, что обеспечивает простой способ настройки электронных свойств такого материала с помощью внешнего электрического поля [2]. Получающийся материал обладает двумерной кристаллической решёткой, аналогичной графену, что позволяет легко расположить его под графеном.

Настоящее исследование направлено на модельное изучение влияния структурных деформаций на величину диэлектрической щели у графена на подложке из дителлурида молибдена.

Расчеты проводились в программном пакете QuantumEspresso [3]. Была использована теория функционала плотности с обобщенной градиентной аппроксимацией (GGA) в параметризации Пердю-Берка-Эрнзерхофа (PBE). Из-за отсутствия сильных связующих взаимодействий между графеном и подложками ожидается, что слабые Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия будут вносить немалый

вклад в результирующий расчет. Поскольку стандартный функционал PBE не может хорошо описать слабые взаимодействия, мы приняли коррекцию vdW (DFT-D3). 2D – зона Бриллюэна отбирается по 8 8 1 k – точкам в рамках схемы Монкхорста-пака для структурной оптимизации и 24 24 1 k - точкам для расчетов электронных структур.

В результате работы были рассчитаны такие электронные характеристики графена на подложке из дителлурида молибдена, как плотность электронных состояний и зонная структура. Из полученных электронных характеристик были получены величина диэлектрической щели у исследуемого материала. Также было исследовано влияние структурной деформации элементарной ячейки на величину полученной запрещенной зоны.

(1)

Формула (1) показывает взаимосвязь между размером диэлектрической щели и электропроводностью [4].

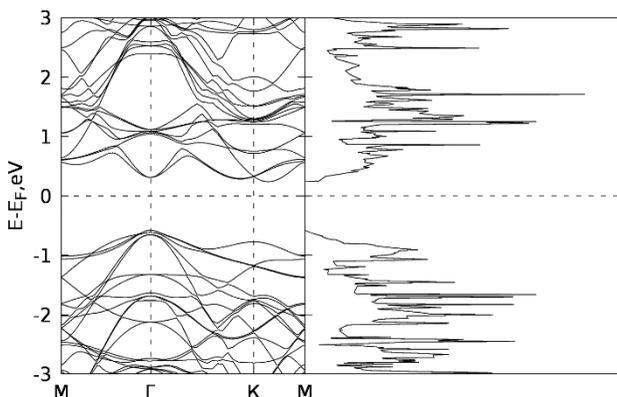


Рис. 1. Зонная структура и плотность электронных состояний Te_2Mo на подложке из графена с уменьшенной на 8 % элементарной ячейкой.

На рис. 1 показана зонная структура и плотность электронных состояний на подложке из графена с уменьшенной на 8 % элементарной ячейкой. На рис. 2 представлена зависимость ширины запрещенной зоны от величины деформации.

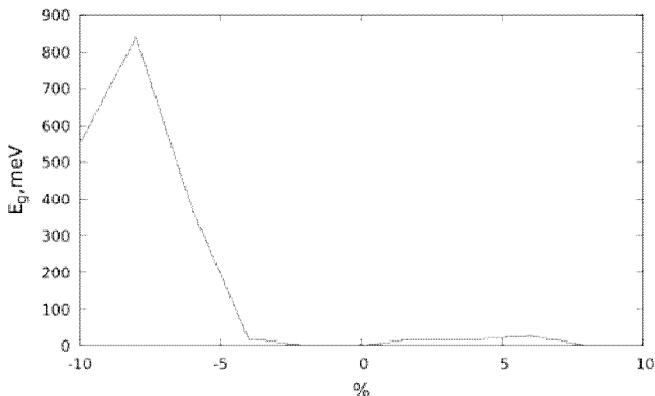


Рис. 2. Зависимость ширины запрещенной зоны от величины деформации.

Из графика ясно видно, что при сжатии элементарной ячейки открывается значительная диэлектрическая щель. Было проведено исследование зависимости величины диэлектрической щели от величины структурной деформации (растяжение и сжатие). Самая широкая запрещенная зона (0.8 эВ) образуется при сжатии элементарной ячейки на 8 %. Главным препятствием в использовании графена для логических и высокоскоростных устройств является отсутствие в нем запрещенной зоны. Настоящая работа предоставляет эффективный способ регулировки ширины запрещенной зоны.

Выражаю благодарность своему научному руководителю Игнатову А.М. и научному консультанту Маслову М.М. за ценные советы при планировании исследования и рекомендации по оформлению статьи.

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., et al. Science. 2004, **306**(5696), 666–669.
2. Ma Y., Dai Y., Guo M., and Huang B. Phys. Rev. B. 2012, **85**, 235448
3. Giannozzi P. et al. J. Phys.: Condens. Matter. 2017, **29**, 465901.
4. S. Li. Semiconductor Physical Electronics, second ed., Springer, Berlin, 2006.

**Разработка и оптимизация метода получения
наноразмерного силиката кальция
с использованием биологически активных стабилизаторов
для регенеративной медицины**

**Маглакелидзе Д.Г., Блинова А.А., Ясная М.А.,
Шевченко И.М., Пирогов М.А.**

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь

E-mail: ogonioc2015@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-69-70

Каждый год множество людей сталкиваются с различными травмами различных тканей, в частности, с повреждениями костных тканей. Подобные травмы влекут за собой сильные болевые ощущения у пострадавшего, длительный период заживления поврежденного участка кости. Для решения данной проблемы используются различные методы регенерации костной ткани. Одним из наиболее распространенных методов является имплантация. Но, в свою очередь, и у этого метода есть свои недостатки, такие как риск отторжения импланта организмом и длительный процесс биоинтеграции. Поэтому актуальной задачей является поверхностная модификация имплантов биологически активными материалами [1]. Так, покрытие на основе наночастиц силиката кальция, стабилизированных аминокислотами, не только может стать дополнительным источником эссенциальных микроэлементов *Ca* и *Si* и аминокислот, но и может выступать в роли биоактивного эффективного моста между имплантом и организмом. Таким образом, ввиду перспективного применения данного материала, целью работы стали разработка и оптимизация метода получения наноразмерного силиката кальция с использованием биологически активных стабилизаторов для регенеративной медицины.

На первом этапе исследования определяли оптимальный кальцийсодержащий прекурсор. В качестве таковых использовали ацетат кальция, хлорид кальция и нитрат кальция. Осадителем выступал силикат натрия. Синтез осуществляли химическим методом в водной среде. С помощью метода точной навески готовили растворы силиката натрия и прекурсоров кальция с концентрацией 0.8 М. Далее в раствор силиката натрия добавляли раствор

прекурсора кальция. Полученные золи отмывали методом декантации дистиллированной водой с помощью центрифуги до $pH = 7$. Далее, отмывые осадки высушивали в сушильном шкафу при температуре 80 °С.

Полученные образцы исследовали с помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе *MIRA3-LMH* с системой определения элементного состава *AZtecEnergy Standard/X-max 20 Tescan* [2]. Анализ результатов показал, что в образце с нитратом кальция наблюдаются крупные агрегаты, имеющие кубическую форму. Микроструктура образца, полученного из хлорида кальция, представлена сферическими частицами со средним диаметром 220 нм. В образце, полученном из ацетата кальция, наблюдается пластинчатая структура частиц, собранная в агрегаты. Таким образом, установлено, что оптимальным стабилизатором является ацетат кальция.

После подбора оптимального кальций-содержащий прекурсора следующим этапом работы стало исследование влияния биологически активных стабилизаторов на микроструктуру наноразмерного силиката кальция. В качестве стабилизаторов использовали аминокислоты: *L*-треонин, *L*-лизин, *L*-цистеин, *L*-изолейцин, *L*-валин, *L*-гистидин и *L*-метионин.

Микроструктуру полученных образцов также исследовали с помощью СЭМ. Анализ полученных результатов показал, что поверхность образцов $CaSiO_3$ с аминокислотами также представлена пластинчатыми структурами, собранными в агрегаты. Установлено, что добавление аминокислоты в наночастицы силиката кальция не оказывает большого влияния на структуру образцов.

В дальнейшем планируется провести исследования физико-химических и медико-биологических свойств материала, а также провести исследования остеогенной активности биопокртия на основе силиката кальция *in vitro*.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект СП-476.2022.4).

1. Царева А.М. и др. Биотехнология. 2020, **36**(5), 31–40.
2. Kuleshov D.S. et al. PCASCNN. 2021, (13), 250–262.

Синтез в СВЧ плазме нанокристаллических алмазных плёнок, легированных германием

Мартьянов А.К., Седов В.С., Тяжелов И.А.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: art.martyanov@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-71-72

Примесные центры окраски в алмазе обладают уникальными спектральными характеристиками: высокой яркостью и стабильностью при комнатной температуре, высокой квантовой эффективностью, короткими временами затухания фотолюминесценции и узкими линиями, и представляют интерес для нанофотоники и квантовой оптики [1]. Наиболее активно изучаются центры азот-вакансия (NV) и кремний-вакансия (SiV). Слабее изучены открытые в 2015 году центры окраски германий-вакансия (GeV) в алмазе, обладающие узкой бесфононной линией в спектрах фотолюминесценции на $\lambda = 602$ нм [2].

В данной работе было произведено легирование поликристаллических алмазных плёнок одновременно азотом и германием. Синтез алмазных плёнок и композитов производился на автоматизированном СВЧ-плазмохимическом реакторе ARDIS 100 (2.45 ГГц) производства компании «Оптосистемы». Полированные монокристаллические кремниевые пластины, используемые в качестве подложек, засеивались детонационными наноалмазами со средним размером частиц 5 нм из суспензии на водной основе. Рост алмаза происходил при следующих параметрах: давление газовой смеси 100 Торр, мощность СВЧ 5 кВт, температура подложки 850 °С. Толщина плёнок контролировалась непосредственно во время синтеза лазерным интерферометром и составляла 2 мкм.

Даже небольшие добавки азота в реактор в процессе CVD синтеза алмаза стимулируют вторичную нуклеацию алмаза и приводят к образованию нанокристаллических плёнок (NCD) вместо стандартных микрокристаллических (MCD). Поэтому был использован также альтернативный способ стимуляции вторичной нуклеации: за счёт повышенной концентрации метана (до 20 %) [3].

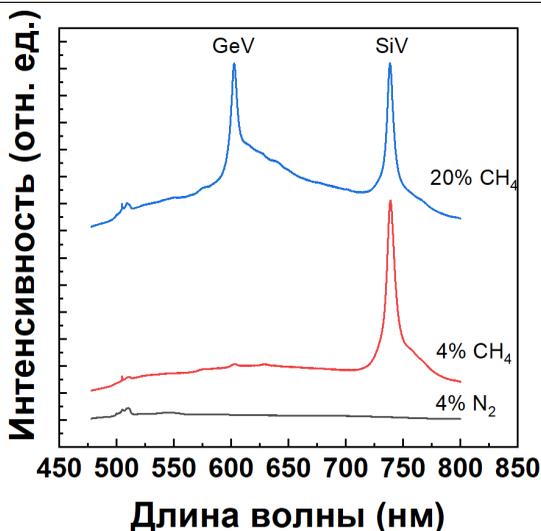


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции поликристаллических алмазных плёнок, легированных германием: MCD при 4 % CH_4 ; NCD за счёт добавки азота или повышенной концентрации метана до 20 %.

Установлено, что изменение структуры алмаза за счёт повышения концентрации метана одновременно ведёт к 50-кратному увеличению интенсивности центров GeV. В то же время изменение структуры алмаза за счёт добавки азота или воздуха полностью тушит фотолюминесценцию GeV и SiV.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФ № 21-72-10153.

1. Aharonovich I., Neu E. *Advanced Optical Materials*. 2014, **2**(10) 911–928.
2. Sedov V.S. et al. *Diamond and Related Materials*. 2018, **90**, 47–53.
3. Sedov V.S. et al. *Diamond and Related Materials*. 2020, **109**, 108072.

Зависимость механических свойств пористого нитинола от структуры кристаллической матрицы

Никифоров Г.А., Галимзянов Б.Н., Мокшин А.В.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

E-mail: nikiforov121998@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-73-74

На сегодняшний день активно набирают популярность «умные» материалы за счёт своих уникальных физических свойств [1]. Одним из таких материалов является никелид титана $Ni_{50}Ti_{50}$ (нитинол) благодаря эффекту памяти формы — способности после пластической деформации полностью восстановить свою исходную форму. Помимо эффекта памяти формы нитинол интересен своей высокой коррозионной стойкостью и биоинертностью, вследствие чего нашел широкое применение как материал для изготовления имплантов [2]. Особый интерес представляют импланты на основе пористого нитинола, так как они могут быть насыщены лекарственными препаратами [3]. Также известно, что живые ткани лучше интегрируются с пористыми имплантами [4]. Эти обстоятельства делают актуальным исследование структуры и механических свойств пористого нитинола. В нашей работе мы воспользовались методом моделирования молекулярной динамики, так как он позволяет получать такие структуры, которые на сегодняшний день еще не удалось получить экспериментальным способом.

Для изучения структуры и механических свойств пористого нитинола нами был разработан оригинальный алгоритм генерации пористой структуры с заданными параметрами пор и пористостью системы. Принцип работы алгоритма заключается в удалении атомов из сплошной кристаллической основы. Выбор алгоритмом области генерации поры в кристаллической матрице происходит случайным образом. В алгоритме предусмотрена возможность задавать размеры пор в зависимости от исследовательской задачи.

В данной работе мы изучали механические свойства при растяжении вдоль оси Ox пористых моделей нитинола, полученных с помощью разработанного нами алгоритма. Мы обнаружили, что упругие, пластические и прочностные свойства пористых образцов с

равномерным распределением кристаллической матрицы вдоль направления деформации выше, чем у аналогичных образцов со случайным распределением (рис. 1, левая панель). На рис. 1 (правая панель) представлено изображение пористой системы нитинола, полученной с помощью предложенного алгоритма, с равномерным распределением кристаллической матрицы вдоль оси Ox при температуре 300 К и давлении 1 атм.

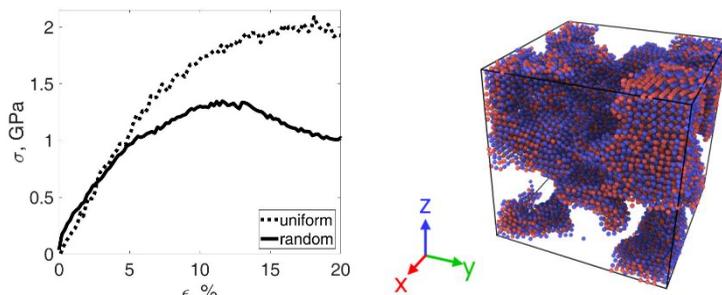


Рис. 1. Мгновенный снимок конфигурации кубической пористой системы размером 9 нм, пористостью 55 % и линейными размерами пор 2.1–5.7 нм (правая панель), график напряжения-деформации при растяжении пористых образцов нитинола с равномерным и случайным распределением кристаллической матрицы (левая панель)

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект №19-12-00022-П). Мокшин А.В. выражает признательность Фонду развития теоретической физики и математики «Базис» (№ 20-1-2-38-1).

1. Qader I.N., Kök M., Dagdelen F. et al. El-Cezerî Journal of Science and Engineering. 2019, **6**, 755–788.
2. Duerig T., Pelton A., Stöckel D. Materials Science and Engineering. 1999, **273**, 149–160.
3. Wang C.K., Wang W.Y., Robert F.M. et al // J. Biomed. Mater. Res. B Appl Biomater. 2010, **93**, 562–572.
4. Волчков С.Е., Шишковский И.В., Байриков И.М. Клеточная трансплантология и тканевая инженерия. 2013, **8**, 51–56.

**Люминесцентные аэрогели
смешанных оксидов $\text{Eu}_2\text{O}_3/\text{Gd}_2\text{O}_3$,
модифицированные органическими сенсбилизаторами
Новоселова К.Н.^{1,2}, Каменева С.В.¹**

*1- Институт общей и неорганической химии
имени Н.С. Курнакова РАН, Москва*

*2- Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва*

E-mail: knnovoselova@edu.hse.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-75-76

Аэрогели (АГ) — это гели, в которых жидкость в порах заменена газом. Аэрогели, содержащие редкоземельные элементы, перспективны для создания различных функциональных материалов, поскольку имеют высокую площадь поверхности и пористость, а также люминесцентные и каталитические свойства [1].

В данной работе с помощью золь-гель метода были получены смешанные АГ оксидов редкоземельных металлов с разным мольным соотношением ($\text{Eu}_2\text{O}_3/\text{Gd}_2\text{O}_3 = 1/0; 0.8/0.2; 0.5/0.5; 0.2/0.8; 0/1$). Были использованы шестиводные нитраты металлов в качестве прекурсоров, пропиленоксид в качестве инициатора гидролиза и лимонная кислота как хелатирующий агент [2]. Полученные в результате гидролиза нитратов европия и гадолиния гели были промыты изопропанолом и подвергнуты обработке в сверхкритическом CO_2 . Полученные материалы были исследованы методами ИК-спектроскопии, рентгенофазового анализа, низкотемпературной адсорбции азота, растровой электронной микроскопии, люминесцентной спектроскопии.

Аэрогели, полученные в ходе работы, оставались монолитными, характеризовались высокими значениями удельной площадью поверхности (335–380 $\text{m}^2/\text{г}$). Микроструктуры аэрогелей состоят из неупорядоченной трехмерной сети взаимосвязанных мелких наночастиц. После отжига при 800 °С удельная площадь поверхности материалов значительно снижается, появляется кристаллическая структура, соответствующая кубической фазе оксидов лантаноидов. Смешанные оксиды после отжига представляют собой твердые растворы, параметр элементарной

ячейки линейно зависит от мольного соотношения РЗЭ в материале.

Трехвалентный ион европия (Eu^{3+}) хорошо известен своей сильной люминесценцией в красной области спектра при облучении УФ-излучением [1]. Для улучшения люминесцентных свойств аэрогели были модифицированы 1,10-фенантролином и терефталевой кислотой на стадии замены растворителя [3–4]. Эти лиганды могут действовать как антенна для поглощения возбуждающего света и передачи энергии возбуждения на ионы Eu^{3+} . После модификации фенантролином и терефталевой кислотой интенсивность люминесценции аэрогелей значительно возросла, кроме того, спектр возбуждения сместился в более длинноволновую область (рис. 1).



Рис. 1 Люминесценция аэрогелей в УФ-камере (основная полоса источника 312 нм).

1. Du A. et al. *Materials* (Basel). 2013, **6**(3), 941–968.
2. Soleimani Dorcheh A., Abbasi M.H. *J. Mater. Process. Technol.* 2008, **199**(1), 10–26.
3. Zhang Z. et al. *RSC Adv. Royal Society of Chemistry*, 2015, **102**(5), 84280–84283.
4. Sun Y. et al. *Eur. J. Inorg. Chem.* 2013, (1), 32–38.

**Плазмонно-диэлектрическая наноструктура
«наноалмаз в чашке»
для усиления флуоресценции SiV-центров.**

**Ромшин А.М.¹, Грициенко А.В.^{2,3},
Мартьянов А.К.¹, Орлов А.П.⁴**

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

*2- Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук, Москва*

*3- Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет), Долгопрудный*

*4- Институт радиотехники и электроники
Российской академии наук, Москва*

E-mail: alex_31r@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-77-79

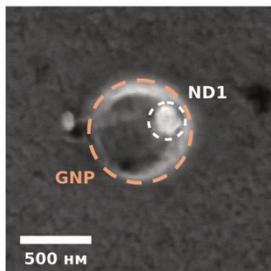
Квантовые технологии открывают широкие возможности в передаче и обработке информации [1, 2]. Для успешного функционирования таких платформ необходимо развивать методы получения квантовых эмиттеров с высокой частотой следования в узком спектральном интервале и ограниченном телесном угле. С целью удовлетворения этим требованиям фотонные эмиттеры помещают в микрорезонаторы [3, 4].

В настоящей работе мы исследуем взаимодействие фотонных эмиттеров в твердотельной матрице с новой плазмонной наноантенной. Такая наноантенна представляет собой субмикронное цилиндрическое углубление (ЦУ) на поверхности золотой пленки, напыленной на кристаллический кремний, и поддерживает резонанс возбуждения на 530 нм. В качестве эмиттеров мы используем отрицательно заряженные центры «кремний-вакансия» (SiV⁻) в алмазных наночастицах, полученных CVD-методом. Обладая узкой бесфононной линией (БФЛ), высокой спектральной и временной стабильностью, SiV-центры являются перспективными фотонными эмиттерами [5].

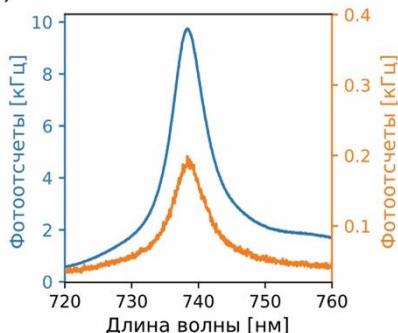
Первоначально алмазные наночастицы изучались на поверхности золотой пленки, а затем при помощи стеклянного

нанокapилляра прецизионно перемещались в предварительно выбранное цилиндрическое углубление (см. рис. 1а).

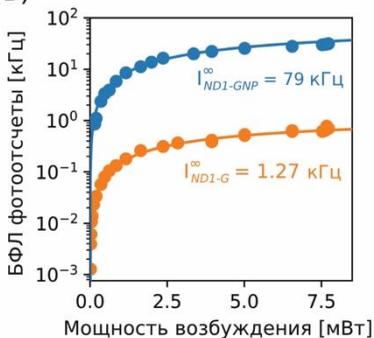
(а)



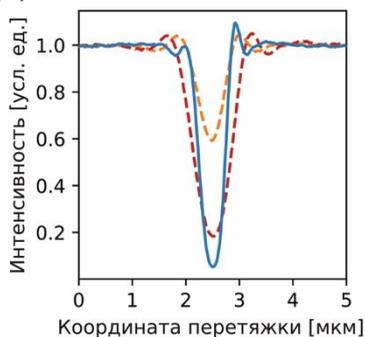
(б)



(в)



(г)



— ND1-GNP — GNP — ND1-G

Рис. 1. (а) — СЭМ-изображение цилиндрического углубления в золотой пленке с алмазной наночастицей размером 160 нм. (б–в) — Спектры флуоресценции и кривые насыщения SiV-центров в НА на поверхности золотой пленки (ND1-G, оранжевая кривая) и внутри ЦУ (ND1-GNP, синяя кривая). (г) — профили изображения перетяжки пучка лазерного возбуждения на длине волны 532 нм для ЦУ (GNP–gold nanopit, красная кривая), НА на поверхности золотой пленки (ND1-G–nanodiamond on gold, оранжевая кривая) и НА внутри ЦУ (ND1-GNP–nanodiamond in gold nanopit, синяя кривая).

На каждом этапе алмазные наночастицы исследовались методом конфокальной спектроскопии. На рис. 1б представлены

спектры SiV-флуоресценции, полученные для одной и той же алмазной наночастицы на поверхности золотой пленки (ND1-G) и в ЦУ (ND1-GNP) при мощности возбуждения $P = 2.5$ мВт на длине волны 532 нм ($\times 100$, $NA=0.95$). Видно, что при взаимодействии с наноантенной интенсивность БФЛ существенно увеличивается $F = I_{ND1-GNP}/I_{ND1-G} \sim 50$. Характер изменения насыщения флуоресценции раскрывается на рис. 1в. Измеренная зависимость $I(P)$ аппроксимируется кривой $I(P) = \frac{P \cdot I^\infty}{P + P_{sat}}$, где P_{sat} — мощность насыщения, I^∞ — интенсивность насыщения флуоресценции. Сравнивая I^∞ для ND1-G и ND1-GNP, получаем максимальный фактор усиления флуоресценции $F_{max} = 62$ раза.

Для выявления механизмов, участвующих в усилении, мы провели измерения отражения перетяжки лазерного возбуждения. Как видно из рис. 1г, экстинкция возбуждающего излучения для НА в наноантенне существенно выше, чем для НА на поверхности золота $R_{ND1}^{min}/R_{ND1-GNP}^{min} \sim 8$. Также были проведены измерения времени жизни флуоресценции, не обнаружившие существенных изменений данной характеристики. Таким образом, увеличение сигнала SiV-флуоресценции преимущественно связано с более эффективным возбуждением центров окраски входным когерентным излучением, что открывает новые возможности для разработки экономичных квантовых платформ.

Работа была поддержана грантом Российского научного фонда № 22-19-00324.

1. Lo H.-K., Curty M., Tamaki K. Nat. Photonics. 2014, **8**, 595–604.
2. Kimble H.J. Nature. 2008, **453**, 1023–1030.
3. Akselrod G., Argyropoulos C., Hoang T. et al. Nature Photon. **8**, 835–840.
4. Benedikter J., Kaupp H., Hümmer, et al. Physical Review Applied. 2017, **7**(2), 024031.
5. Vlasov I.I., Barnard A.S., Ralchenko, et al., Advanced Materials. 2009, **21**(7), 808–812.

Стехиометричный фторидофосфат $KVPO_4F$ и углеродный композит на его основе как материал для обратимой де/интеркаляции ионов щелочных металлов

Самарин А.Ш.

Сколковский институт науки и технологий, Москва

E-mail: aleksandr.samarin@skoltech.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-80-82

Одним из ключевых элементов, определяющих ёмкость аккумулятора, является материал положительного электрода (анода). На сегодняшний день известно множество соединений, которые были исследованы в качестве анода в металл-ионных аккумуляторах. В частности, отдельный интерес представляют соединения, содержащие фосфатную группу, в том числе оксо- и фторидофосфаты.

Соединения, принадлежащие к структурному типу калий-титанил фосфата ($KTiOPO_4$, КТФ), являются перспективными материалами для применения в так называемых «пост-литиевых» системах, например, в калий-ионных [1, 2]. Среди них достаточно хорошо изучены два близких состава: $KVPO_4F$ и $KVOPO_4$, которые в свою очередь могут образовывать ряд непрерывных твёрдых растворов. Соотношение V:O оказывает прямое влияние на одну из важнейших характеристик — рабочий потенциал [3]. Направленный синтез стехиометричного состава и композита на основе $KVPO_4F$ с последующим изучением его свойств являются целью данной работы.

Серия композитов $KVPO_4F/C$ с различным содержанием углерода была синтезирована в две стадии с привлечением метода сублимационной сушки. По данным рентгеновской дифракции полученные образцы являются однофазными ($a = 12.8302(7) \text{ \AA}$, $b = 6.4027(3) \text{ \AA}$, $c = 10.6175(4) \text{ \AA}$, $V = 872.21(7) \text{ \AA}^3$, $GOF = 2.10$, $R_{wp} = 1.79$). Содержание сажи было рассчитано из данных термогравиметрии. По данным сканирующей электронной микроскопии материал представляет собой агломераты величиной не более 10 мкм, которые в свою очередь состоят из первичных частиц меньшего размера.

Электрохимические свойства полученных композитов были исследованы в К-полуячейках (электролит 0.5 М KPF₆ в смеси этиленкарбонат-пропиленкарбонат) в интервале потенциалов 3.5–5.0 В отн. К⁺/К. Наибольшую величину разрядной ёмкости (100 мАч·г⁻¹) демонстрирует образец, содержащий 9 % остаточной сажи (рис. 1, красная линия) при среднем рабочем потенциале ~4.3 В отн. К⁺/К.

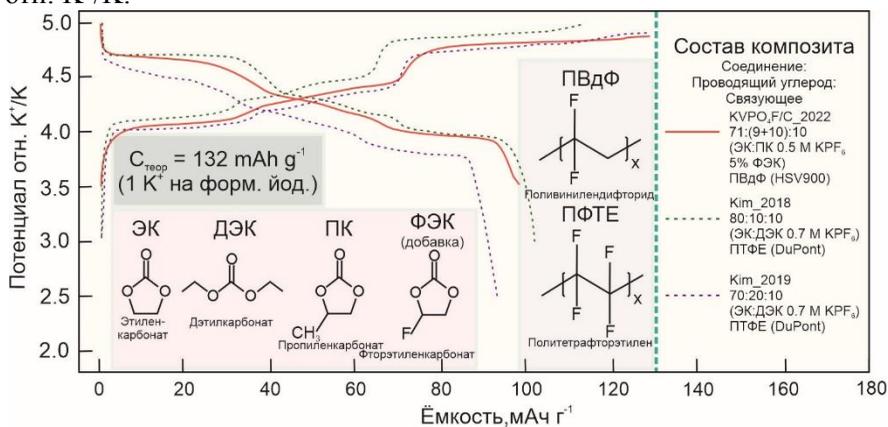


Рис. 1. Сравнение кривых гальваностатического циклирования фазы KVPO₄F в калиевых полуячейках (составы электролитов и электродной смеси указаны на рисунке). Зелёной штрих-пунктирной линией указана теоретическая ёмкость указанного состава.

В докладе будут обсуждены детали двухстадийного синтеза материала, влияния количества сажи, а также методик её введения в композит, на электрохимические свойства. Будут обсуждены причины падения ёмкости в течение циклирования и общие подходы к получению стабильного электрохимического поведения [4].

Автор выражает благодарность к.х.н. Федотову С.С., к.х.н. Никитиной В.А. за помощь в формулировке задачи и обсуждении результатов. Автор выражает благодарность магистранту Шипицину В.И. за помощь в проведении измерений и обработке данных.

1. Kim H., Ji H., Wang J., Ceder G., Trends. Chem. 2019, **7**, 682–692.
2. Tian Y., Zeng G., Rutt A. et al. Chem. Rev. 2020, **121**, 1623–1669.

3. Wernert R., Nguyen L.H.B., Petit E. et al. Chem. Mater. 2022, **34**, 4523–4535.
4. Kim H., Tian Y., Ceder G. J. Electrochem. Soc. 2020, **167**, 110555.

Изготовление микропористого алмаза из синтезированного в СВЧ плазме композита алмаз-германий

Седов В.С., Мартьянов А.К., Тяжелов И.А.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: sedovvadam@yandex.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-83-84

Микропористые алмазные плёнки — новый тип материала, который вызывает всё больший интерес для приложений, где требуется высокое соотношение площади поверхности к объёму: электрохимии, электронике, высокоэффективной жидкостной хроматографии, при изготовлении 3D-детекторов ионизирующего излучения и механически прочных фильтров [1–2]. Также, пористость может быть использована в качестве просветляющего слоя в алмазной оптике. В данной работе предложен новый метод формирования микропористых алмазных плёнок путём изготовления композитных материалов алмаз-германий с последующим селективным вытравливанием германиевой компоненты (рис. 1).

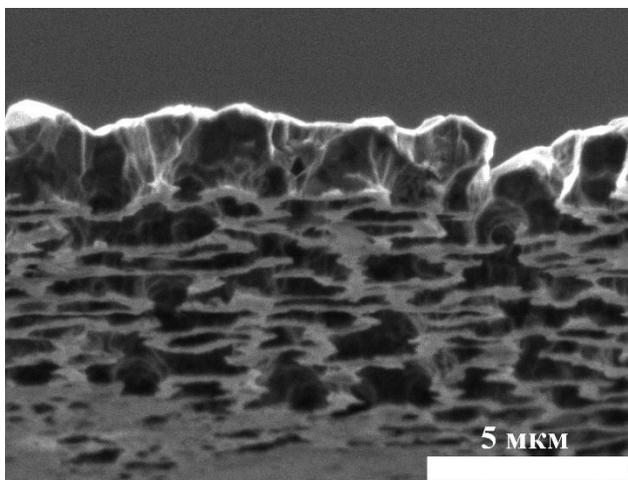


Рис. 1. Изображения РЭМ алмазной плёнки после вытравливания кристаллитов германия.

Полированные монокристаллические кремниевые пластины, используемые в качестве подложек, засеивались детонационными наноалмазами со средним размером частиц 5 нм из суспензии на водной основе. Затем химическим осаждением из метан-водородной СВЧ-плазмы в реакторе ARDIS 100 (2.45 ГГц) выращивалась первичная микрокристаллическая алмазная плёнка. Параллельно в камеру подавался герман GeH_4 , что приводило к нуклеации и разрастанию зёрен кристаллического германия одновременно с алмазом.

Образование зерен Ge в матрице алмаза имеет место при относительно низких температурах 750–800 °С, а при более высоких температурах 850–950 °С алмазная фаза доминирует за счет более высокой скорости роста и блокирования развития зерен Ge. С использованием селективного травления германиевой компоненты в смеси плавиковой и азотной кислот получены образцы микропористого поли- и монокристаллического алмаза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФ № 21-72-10153.

1. Pikuz T. et al. Scientific Reports. 2015, **5**(1), 1–10.
2. Ralchenko V. et al. Carbon. 2022, **190**, 10–21.

Исследование эффективности стабилизации наночастиц селена кокаמידопропиламинооксидом

**Сляднева К.С., Блинов А.В., Маглакелидзе Д.Г.,
Блинова А.А., Бражко Е.А.**

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь

E-mail: kristina.shagina.02@bk.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-85-87

Селен является критически важным микроэлементом, имеющим фундаментальное значение для здоровья человека [1, 2]. Так, селен играет важную роль в функционировании иммунной системы, предотвращает образование свободных радикалов в клетках кожи и т.д. [3]. Высокодисперсный *Se* обладает высокой биодоступностью и низкой токсичностью по сравнению с другими неорганическими формами, ввиду чего он обладает уникальными физическими, химическими и физико-химическими свойствами [4–6]. Поэтому целью работы является синтез и исследование эффективности стабилизации наночастиц селена кокаמידопропиламинооксидом.

Наночастицы селена были получены методом химического восстановления селенистой кислоты аскорбиновой кислотой в водной среде. В качестве селенсодержащего прекурсора использовали селенистую кислоту. Стабилизатором выступал кокаמידопропиламинооксид.

На первом этапе исследований определяли средний гидродинамический радиус образцов наночастиц селена с помощью фотонной корреляционной спектроскопии на установке «*Photocor-Complex*» (ООО «Антекс-97», Россия). Компьютерная обработка данных осуществлялась с использованием компьютерного программного обеспечения *DynaLS*.

Измерения среднего гидродинамического радиуса контрольного образца наночастиц селена проводились в течение 5 недель с момента проведения синтеза.

На следующем этапе определяли влияние растворов с определенным рН на стабильность образцов наночастиц селена. Для этого готовили раствор уксусной, фосфорной и борной кислот 0.04 М в отношении каждой из них. Отдельно готовили 0.2 Н раствор *NaOH*.

Затем для получения буферного раствора с необходимым рН к 100 см^3 раствора кислот добавляли $x \text{ см}^3$ раствора NaOH . Затем в пробирку отбирали 1 см^3 образца наночастиц селена и добавляли к нему 1 см^3 буферного раствора. Таким образом получили 11 растворов наночастиц селена с различными значениями рН.

В результате синтеза был получен образец наночастиц селена, стабилизированный кокамидопропиламинооксидом, имеющий средний гидродинамический радиус $12,12 \pm 3 \text{ нм}$. Полученный образец исследовался на стабильность в течение 5 недель. Зависимость среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена от времени выдержки представлена на рис. 1.

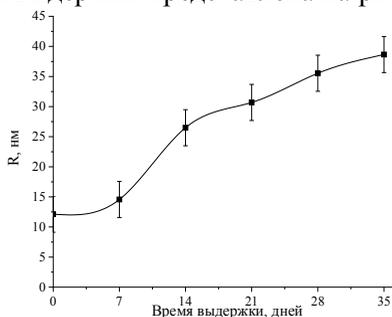


Рис. 1. Зависимость от времени выдержки среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена, стабилизированных кокамидопропилоксидом.

На рис. 1 видно, что гидродинамический радиус в образце наночастиц селена, стабилизированного кокамидопропиламинооксидом, увеличивался на протяжении 5 недель от $12,12 \text{ нм}$ до $38,65 \text{ нм}$ и находился в наноразмерном диапазоне, что свидетельствует о его стабильности.

Анализ влияния рН среды на стабильность растворов наночастиц селена проводился двумя методами: визуальным и оптическим с помощью фотонно-корреляционной спектроскопии. На рис. 2 представлена фотография образцов с различными значениями рН буферного раствора.

На основе рис. 2 можно сделать выводы о том, что в щелочной среде с рН от 7.96 до 11.98 раствор наночастиц селена нестабилен.



Рис. 2. Фотография растворов наночастиц селена, стабилизированного кокамидопропиламинооксидом, с различными значениями pH буферного раствора

Анализ результатов фотонной корреляционной спектроскопии показал, что отклонений от значения среднего гидродинамического радиуса контрольного образца наночастиц селена на 10 нм с добавлением pH от 1.81 до 9.1 не наблюдается, от 10.38 до 11.98 происходит агломерация частиц с размером порядка 300–400 нм. Изменение размера и стабильности наночастиц селена при разных pH среды связано с тем, что в молекуле кокамидопропиламинооксида присутствуют amino- и карбоксильные группы, позволяющие ему проявлять амфифильные свойства. В кислой среде происходит активация аминогрупп, а в щелочной среде — активация карбоксильных групп.

Исследования проводятся при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям)», Договор № 17191ГУ/2021 от 19.12.2021.

1. Wang P. *Current Opinion in Biotechnology*. 2006, **17**(6), 574–579.
2. Kielczykowska M. et al. *Adv. Clin. Exp. Med.* 2018, **27**(2), 245–255.
3. Arthur J.R., McKenzie R.C., Beckett G.J. *The Journal of nutrition*. 2003, **133**(5), 1457S–1459S.
4. Forootanfar H. et al. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 2014, **28**(1), 75–79.
5. Kumar N., Krishnan K.K., Singh N.P. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018, **25**(9), 8914–8927.
6. Blinov A.V. et al. *Russian Journal of General Chemistry* 2022, **92**(3), 424–429.

Синтез и исследование структуры нанокompозита $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$

**Тараванов М.А., Маглакелидзе Д.Г., Блинов А.В.,
Гвозденко А.А., Голик А.Б.**

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь

E-mail: pronapro82@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-88-89

В настоящее время одной из задач технической отрасли стала разработка инновационных покрытий для защиты различных материалов от агрессивных условий окружающей среды. Для данной цели отлично подходят нанокompозиты оксидов металлов. Покрытия на основе этого материала обладают высоким показателем адгезии и большим краевым углом смачивания (гидрофобностью), что обусловлено упорядоченной структурой и определенной шероховатостью самого нанокompозита [1]. Таким образом, ввиду перспективного применения данного материала, актуальной задачей стали синтез и исследование структуры нанокompозита $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$.

Нанокompозит $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ получали золь-гель методом в водно-спиртовой среде. В качестве прекурсора диоксида кремния использовали тетраэтоксисилан (ТЭОС), а диоксида титана — тетрахлорид титана. Осадителем выступал водный раствор аммиака.

На первом этапе синтеза нанокompозита, растворяли ТЭОС и тетрахлорид титана в спиртовой среде, далее в реакционную массу вводили водный раствор аммиака, после чего золь $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ перемешивали в течение 24 часов. На следующем этапе отмывали золи методом декантации дистиллированной водой с помощью центрифугирования до $\text{pH} = 7$. Отмытые образцы перемещали в муфельную печь и прокаливали при $500\text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, по данной методике была изготовлена серия образцов нанокompозита $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, содержащих в составе от 10 до 90 % диоксида титана.

Далее исследовали микроструктуру полученных образцов методом сканирующей электронной микроскопии на приборе *MIRA3-LMH* с системой определения элементного состава *AZtecEnergy Standard/X-max 20* [3]. Результаты представлены на рис. 1.

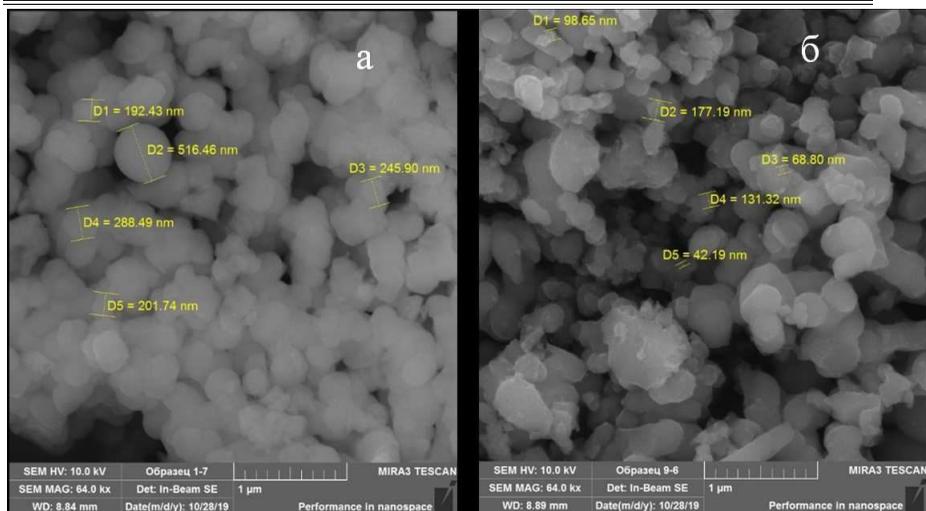


Рис. 1. СЭМ-микрофотографии образцов SiO_2-TiO_2 , содержащих: 90 % SiO_2 –10 % TiO_2 (а) и 10 % SiO_2 –90 % TiO_2 (б).

Анализ СЭМ-микрофотографий показал, что образцы нанокompозита SiO_2-TiO_2 , содержащие от 10 до 40 % TiO_2 , состоят из сферических частиц, а при повышении содержания TiO_2 от 40 до 90 % структура образцов меняется — происходит образование частиц неправильной формы. Важно отметить, что в образцах с содержанием TiO_2 от 40 до 90 % присутствуют частицы с более развитой поверхностью и меньшим диаметром.

1. Соломянский А.Е. и др. Доклады национальной академии наук Белоруссии. 2013, **57**(1), 63–66.
2. Li Y., Murphy P., Wu C.Y. Fuel Processing Technology. 2008, **89**(6), 567–573.
3. Blinov A.V. et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021, **1029**(1), 012060.

Исследование люминесценции стабильных коллоидных растворов наночастиц $\text{LaF}_3:\text{Nd}^{3+}$, диспергированных в диметилсульфоксиде

Тимофеева Е.Э., Шайдулин А.Т.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: elena16051997@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-90-92

Целью этого исследования является уменьшение тушения люминесценции водных коллоидных растворов наночастиц (НЧ) $\text{LaF}_3:\text{Nd}^{3+}$, синтезированных гидротермальным методом с микроволновым нагревом (ГТМВ) [1], с помощью диспергирования НЧ в апротонном растворителе диметилсульфоксиде (ДМСО).

Фундаментальные исследования люминесценции НЧ важны в связи с перспективами их широкого применения в различных областях биологических и медицинских приложений, таких как биовизуализация, локальный управляемый нагрев, локальное термическое разрушение и доставка лекарств.

Измеренная кинетика люминесценции уровня ${}^4\text{F}_{3/2}$ иона Nd^{3+} в 0.1 ат.% НЧ $\text{LaF}_3:\text{Nd}^{3+}$

$$I_{\text{изм}}(t) = N(t) \exp(-t/\tau_{\text{рад}}) \quad (1)$$

демонстрирует в основном тушение люминесценции, связанное с тушением Nd-OH . Здесь $\tau_{\text{рад}}$ — радиационное время жизни уровня ${}^4\text{F}_{3/2}$ иона Nd^{3+} в НЧ, диспергированных в ДМСО ($\tau_{\text{рад}} = 930$ мкс) и в воде ($\tau_{\text{рад}} = 1300$ мкс), полученное при анализе ферстеровской кинетики тушения люминесценции [2]

$$N(t) = \exp(-\gamma_{\text{ОН}} \sqrt{t}). \quad (2)$$

Разница в радиационных временах жизни связана с разницей в показателях преломления растворителя ($n(\text{H}_2\text{O}) = 1.333$) и $n(\text{ДМСО}) = 1.477$) [3]. Мы предполагаем, что статическое тушение возбужденных ионов Nd^{3+} вызвано неконтролируемыми OH- группами, присутствующими в объеме НЧ (рис. 1). Макропараметр статического тушения $\gamma_{\text{ОН}}$, определяемый наклоном кинетики (рис. 1), пропорционален средней концентрации OH- групп ($n_{\text{ОН}}$) в НЧ.

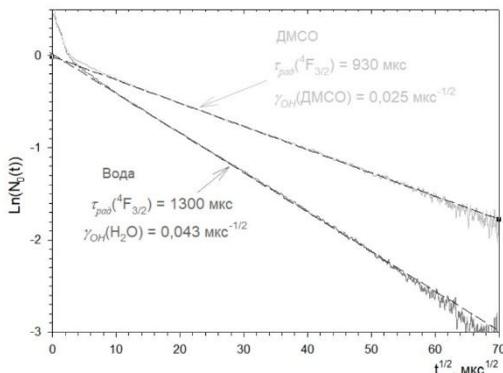


Рис. 1. Кинетика статического тушения люминесценции уровня ${}^4F_{3/2}$ иона Nd^{3+} коллоидов НЧ 0.1 ат.% $LaF_3:Nd^{3+}$.

Тёмно-серая кривая — НЧ диспергированные в воде, серая кривая — НЧ в ДМСО; штриховыми черными линиями показан наклон кинетики тушения люминесценции на примеси, по которому определяется макропараметр переноса энергии γ_{OH} .

Из соотношения $\gamma_{OH}(DMSO)/\gamma_{OH}(H_2O) = n_{OH}(DMSO)/n(H_2O) = 0.58$ следует, что концентрация OH^- в НЧ, диспергированных в ДМСО, в 1.56 раза ниже, чем в водных НЧ. Это важнейший фактор, определяющий в среднем в 1.65 раза более высокий относительный квантовый выход [2]

$$\eta \approx \frac{1}{\tau_{rad}} \int_0^{\infty} I_{изм}(t) dt \quad (3)$$

и яркость люминесценции [4] НЧ в ДМСО по сравнению с теми же НЧ в воде (табл. 1)

$$v = \eta \times n_{Nd}, \quad (4)$$

где n_{OH} и n_{Nd} — абсолютные концентрации в nm^{-3} .

В результате квантовый выход люминесценции η увеличился почти вдвое при замене растворителя с воды на ДМСО (таб. 1). Это объясняется тем, что при смене дисперсионной среды НЧ с воды на ДМСО часть акцепторов (около половины) удаляется из объема НЧ.

Таблица 1

Относительный квантовый выход люминесценции η и яркость ν для двух коллоидных растворов НЧ 0.1 ат.% LaF₃:Nd³⁺

Среда	радиационное время жизни τ_{rad} , МКС	макропараметр статистического тушения γ_{OH} , МКС ^{-1/2}	квантовый выход люминесценции η , %	яркость ν , НМ ⁻³
Вода	1300	0.043	31	0.6
ДМСО	930	0.025	51	0.9

Вторая причина увеличения квантового выхода люминесценции связана с уменьшением радиационного времени жизни τ_{rad} из-за большего показателя преломления ДМСО. Таким образом, диспергированные в растворителе ДМСО НЧ LaF₃:Nd³⁺ могут быть перспективны для биомедицинского применения.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Орловскому Ю.В. и Орловской Е.О. за постановку научной задачи и обсуждение результатов, к.ф.-м.н. Попову А.В. за помощь в измерениях и формальном анализе результатов. Также благодарим Федоренко С.Г. за разработку метода анализа кинетики примесного тушения и консультации по интерпретации полученных результатов.

Шайдулин А.Т. и Орловская Е.О. благодарны за поддержку Российскому научному фонду (проекту № 22-22-00998).

1. Popov A., Orlovskaya E., Shaidulin A. et. al. J. Nanomater. 2021, **11**, 2847.
2. V.M. Agranovich, M.D. Galanin. Electron Excitation Energy Transfer in Condensed Matter, in.: V.M. Agranovich, A.A. Maradudin (Eds.), Elsevier North-Holland in Amsterdam, New York, 1982, 371.
3. Pukhov K.K., Basiev T.T., Orlovskii Yu.V. JETP Letters 2008, **88**(1), 12.
4. Orlovskii Yu.V., Popov A.V., Orlovskaya E.O., et.al. J. Alloys Compd. 2018, **756**, 182–192.

Исследование свойств углеродных точек для применения в органических светодиодах (OLED)

Томская А.Е.¹⁻³, Смагулова С.А.³

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

2- Московский физико-технический институт, Долгопрудный

3- Северо-Восточный федеральный университет, Якутск

E-mail: tsash23@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-93-94

Углеродные точки (УТ) — новый тип наночастиц, характеризующийся малыми размерами (<10 нм). УТ обладают следующими свойствами, такими как фотолюминесценция (ФЛ) с высоким квантовым выходом, перестраиваемая длина волны излучения, низкая цитотоксичность, хорошая биосовместимость, высокая фотостабильность, химическая инертность, возможность пассивации или функционализации поверхности и др. [1]. УТ находят применение в различных областях, включая доставку лекарств, биологическую визуализацию и медицинскую диагностику, флуоресцентные чернила, химическое обнаружение органических веществ и ионов металлов, катализ и оптоэлектронику. Благодаря простому методу синтеза из органических материалов УТ являются экологически чистой и недорогой альтернативой полупроводниковым квантовым точкам, состоящим из тяжелых металлов.

В этой работе УТ, синтезированные из лимонной кислоты и этилендиамина, проявляют интенсивную ФЛ, что объясняется наличием изолированных sp^2 -доменов (в основном молекул флуорофора, которые ковалентно связаны с УТ и производными пиридина) и дефектными состояниями (оборванные углеродные связи).

Мы исследовали четыре типа УТ, легированных азотом. Комбинация лимонной кислоты в качестве источника углерода и азотсодержащих молекул в качестве допантов является наиболее хорошо изученным методом синтеза УТ легированных азотом. N-легированные УТ были приготовлены гидротермальным методом с использованием этилендиамина и лимонной и транс-аконитовой

кислот. Из результатов структурного анализа следует, что УТ можно рассматривать как углеродное ядро, которое содержит на поверхности и краях агрегированные флуорофоры. Изучены оптические свойства УТ: они обладают широким пиком ФЛ в области 400–550 нм с максимумами излучения при 440–450 нм с квантовыми выходами ФЛ 56–77% (рис. 1).

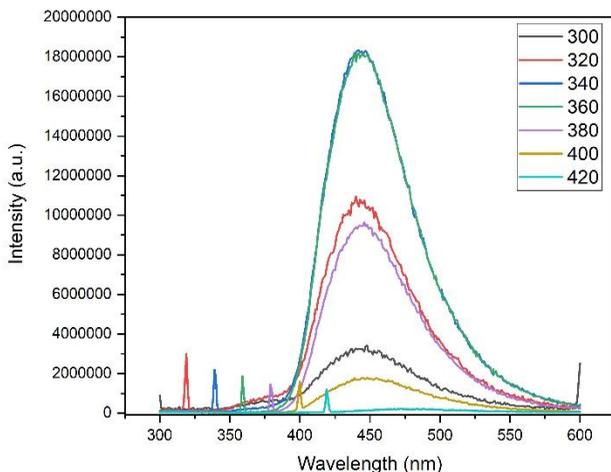


Рис. 1. Спектр ФЛ образца УТ при длинах волн возбуждения 300–420 нм.

Авторы выражают благодарность Образцовой Е.Д., РНФ (проект № 20-42-08004) и Минобрнауки России (гос. задание FSRG-2020-0017 на 2020-2022 гг.) за финансовую поддержку.

1. Wang B., Song H., Qu X. et al. *Coordination Chemistry Reviews*. 2021, **442**, 214010(18).

Влияние отжига в CH_4/H_2 СВЧ плазме на фотолюминесценцию порошков $\text{SrF}_2:\text{Eu}$

**Тяжелов И.А., Мартьянов А.К., Седов В.С.,
Дробышева А.Р., Ермакова Ю.А., Александров А.А.**

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: tiazhelov@rambler.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-95-96

В последнее десятилетие разработаны источники мощного рентгеновского излучения: синхротроны и лазеры на свободных электронах [1]. Проблемой визуализации интенсивного излучения является то, что используемые материалы (например LiF) быстро деградируют [2]. Из-за невысокой теплопроводности (~ 4 Вт/(м \times К) при н.у.) происходит слабое рассеяние тепла и резкий локальный нагрев.

Радиационно-стойкие материалы для использования в визуализаторах рентгеновского излучения должны обладать (i) высокой теплопроводностью, (ii) интенсивной рентгенолюминесценцией, (iii) химической стабильностью. Алмаз обладает рекордными физико-химическими свойствами: имеет самую большую теплопроводность среди объёмных материалов (~ 2100 Вт/(м \times К) при н.у.), прозрачен, устойчив к рентгеновскому излучению и химически инертен. Ионы европия, встроенные в кристаллическую решетку некоторых соединений, способны вызывать интенсивную люминесценцию, причем длина волны излучаемого света зависит от степени окисления ионов европия. Ранее в нашей статье 2022 года было показано, что композиты на основе алмазной матрицы с внедренными редкоземельными частицами могут демонстрировать яркую рентгенолюминесценцию в видимом диапазоне [3].

В работе проведено изучение влияния СВЧ плазмы на оптические свойства порошков $\text{SrF}_2:\text{Eu}$. Нанопорошки $\text{SrF}_2:\text{Eu}$ были получены методом осаждения из водных растворов с последующей термообработкой при температуре 600 °С. Была произведена серия отжигов порошков на подложках (100)-ориентированного

монокристаллического кремния в плазме метан-водород при температуре 880 °С в течение 2, 6, 10 и 30 мин и в чистой водородной плазме при температуре 840 °С в течение 10 мин. Воздействие любой плазмы в течение даже 2 минут кардинально меняет спектр фотолюминесценции образцов (рис. 1).

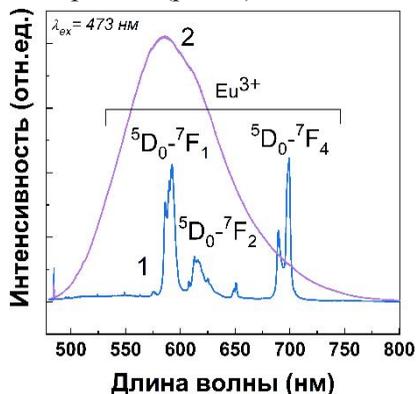


Рис. 1. Типичные спектры фотолюминесценции до (1) и после (2) отжига образцов в плазме. Возбуждение излучением 473 нм.

В результате выявлено, что воздействие метан-водородной плазмы на порошки $\text{SrF}_2:\text{Eu}$ приводит к резкому изменению спектра фотолюминесценции: вместо набора узких линий наблюдается широкополосная фотолюминесценция в диапазоне 480–750 нм с максимумом около 580 нм. Изменение спектра люминесценции возможно из-за восстановления Eu^{3+} до Eu^{2+} .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-13-00401).

1. Pikuz T. et al. Scientific Reports. 2015, **5**(1), 1–10.
2. Kurobori T. et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2014, **326**, 76–80.
3. Kuznetsov S.V. et al. Ceramics International. 2022, **48**, 12962–12970.

Магнитная фазовая диаграмма и магнотстрикционные свойства многокомпонентных сплавов $Tb_{0.16}Ho_{0.84}(Fe,Co)_2$

Хоменко М.Р.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, Москва*

e-mail: khomenko.mr17@physics.msu.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-97-98

В настоящее время является актуальной проблема поиска функциональных материалов, обладающих высокими значениями магнотстрикции, а также магнотстрикционной восприимчивости в малых полях. Гигантскими значениями магнотстрикции обладают редкоземельные металлы (РЗМ), однако для получения большого эффекта в малых полях необходимо добиться повышения температуры Кюри и минимизировать магнитокристаллическую анизотропию (МКА). В последние годы возобновился интерес мирового научного сообщества к исследованиям сплавов со структурой фаз Лавеса типа RT_2 с кубической кристаллической структурой (R—РЗМ, T—3d-переходной металл). Наиболее известные соединения фазы Лавеса с гигантской магнотстрикцией насыщения при комнатной температуре — это $TbFe_2$ и $SmFe_2$.

Соединения $TbFe_2$ и $HoFe_2$ имеют противоположные знаки первой константы МКА. Поэтому использование Tb и Ho в специально рассчитанных концентрациях позволяет скомпенсировать магнитную анизотропию РЗ подрешётки. В то же время, ионы Fe и Co также имеют разные знаки первой константы МКА, что дает дополнительный механизм управления МКА новых функциональных сплавов системы $(Tb, Ho)(Fe, Co)_2$. Целью настоящей работы являлось определение температур спин-переориентационных фазовых переходов (СПП) и построение магнитной фазовой диаграммы системы многокомпонентных соединений $Tb_{0.16}Ho_{0.84}(Fe, Co)$.

Сплавы $Tb_{0.16}Ho_{0.84}Fe_{2-x}Co_x$ ($x = 0.1; 0.2; 0.3$ и 0.4) были получены методом высокочастотной индукционной плавки в алундовом тигле в атмосфере особо чистого аргона. Затем образцы подвергали гомогенизирующему отжигу в течение двух недель. Рентгеновский спектр при комнатной температуре снимался на дифрактометре ДРОН-4 в CuK_α излучении на порошковых образцах.

Параметры элементарной ячейки определялись по отражениям в области углов $2\theta = 15\text{--}105^\circ$. Температуры Кюри определялись из измерений намагниченности. Измерения магнитострикции проводились с помощью тензорезисторов, изготовленных из тензочувствительной проволоки, не обладавшей заметным гальваномагнитным эффектом. Для измерений использовались поликристаллические образцы в форме тонкого диска для уменьшения влияния размагничивающего фактора. Ошибка измерений определялась точностью измерения напряжения разбаланса моста и составляла менее 8 %.

Анализ дифракционных спектров показал, что синтезированы однофазные сплавы. Атомно-кристаллическая структура соединений изотипна структуре кубической фазы Лавеса C15 (MgCu_2). Были рассчитаны значения параметра решетки a и объем элементарной ячейки V при комнатной температуре.

Магнитострикционные деформации чувствительны к магнитным и структурным изменениям в образце, поэтому измерение магнитострикции удобно использовать как способ выявления магнитных и структурных фазовых переходов. Были получены полевые и температурные зависимости продольной λ_{\parallel} и поперечной λ_{\perp} магнитострикции в интервале температур 90–320 К в магнитных полях до 12 кЭ, а также рассчитаны анизотропная и объемная магнитострикция. Во всех сплавах наблюдается положительная продольная и отрицательная поперечная магнитострикция.

Температуры СПП определены по аномалиям на температурных зависимостях магнитострикции. Во всех сплавах обнаружено усиление отрицательной анизотропной магнитострикции при понижении температуры, которое вызвано уменьшением эффективной константы анизотропии вблизи температуры СПП. Обнаружено, что малые замещения Fe кобальтом повышают температуру Кюри, а значит, и температурную стабильность магнитной подсистемы функциональных материалов. По результатам исследований построена магнитная фазовая диаграмма системы $\text{Tb}_{0.16}\text{Ho}_{0.84}\text{Fe}_{2-x}\text{Co}_x$. Определены перспективные составы для создания функциональных материалов.

Автор выражает благодарность доц. Карпенкову А.Ю. за предоставленные образцы и ст. преп. Панкратову Н.Ю. за помощь по анализу экспериментальных данных.

Сравнительное исследование кристаллов диоксида циркония, частично стабилизированного оксидами редкоземельных элементов

Числов А.С.^{1,2}, Кулебякин А.В.¹, Милович Ф.О.²

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

*2- Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС», Москва*

E-mail: Chislov.artem@bk.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-99-100

Материалы на основе частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ) используются в различных областях науки и техники в качестве конструкционных неметаллических материалов. ЧСЦ обладает высоким значением твердости и трещиностойкости, тугоплавкостью, способностью работать в условиях агрессивных сред. Для стабилизации диоксида циркония можно использовать оксиды щёлочноземельных или редкоземельных элементов, однако твердые растворы, стабилизированные оксидом иттрия, исследованы наиболее широко. Вместе с тем большой интерес вызывают материалы, стабилизированные оксидами других редкоземельных металлов, в частности, гадолиния, которые могут использоваться в качестве термобарьерных покрытий, поскольку они обладают низкой теплопроводностью.

Целью данной работы являлось выполнение сравнительного анализа особенностей структуры и механических свойств кристаллов ЧСЦ, стабилизированных разными оксидами.

Кристаллы ЧСЦ были получены методом направленной кристаллизации расплава в холодном тигле. Были выращены три серии кристаллов, стабилизированных оксидом иттрия, самария или оксидом гадолиния в сопоставимых концентрациях от 2.0 до 4.0 мол%. Представлены результаты исследования фазового состава, кристаллической структуры и механических свойств полученных кристаллов. Определение фазового состава кристаллов осуществлялось методом рентгеновской дифрактометрии. Микротвердость и трещиностойкость кристаллов были измерены

методом индентирования.

Исследование фазового состава показало, что все кристаллы содержат две тетрагональные фазы с различной степенью тетрагональности. Проведена оценка содержания Y_2O_3 , Sm_2O_3 и Gd_2O_3 в этих фазах. Обсуждается влияние различий фазового состава кристаллов на механизмы трансформационного упрочнения. Показано, что эффективность трансформационного упрочнения требует сохранения максимального количества тетрагональной фазы и оптимальной трансформационной способности этой фазы. Величина трещиностойкости в значительной степени зависит от микроструктуры и фазового состава материала. В свою очередь, кристаллическая структура сильно зависит от концентрации и вида стабилизирующего оксида.

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Ломоновой Е.Е. и к.ф.-м.н. Табачковой Н.Ю. за постановку научной задачи и обсуждение результатов исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-29-01220.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Фазовые превращения материалов в смесях порошков металлов и BN (cub/hex) с катализаторами в гиротронном разряде

Гаянова Т.Э., Образцова Е.А., Степахин В.Д.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: tatyanagayanova97@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-101-102

Структуры из нитрида бора находят применение в различных отраслях промышленности, техники, медицины [1, 2]. Целью данной работы является демонстрация оптимизации процессов синтеза вторичных веществ в результате разряда мощного гиротрона в смесях порошков металлов и кубической или гексагональной модификации нитрида бора (cBN/hBN) с катализаторами [3]. Была проведена серия экспериментов с нитридом бора в смеси с водородосодержащими добавками, используемыми в качестве катализатора, и металлами. Порошки, используемые в эксперименте:

1. (h)BN+20 %Ti с катализаторами: карборан ($B_{10}H_{10}C_2H_2$), $B_{10}H_{10}(Et_3NH)_2$, $B_{12}H_{12}(Bu_4N)_2$; (c)BN+20 %Ti с катализаторами: карборан $B_{10}H_{10}C_2H_2$, $B_{10}H_{10}(Et_3NH)$, $B_{12}H_{12}(Bu_4N)_2$;
2. (h)BN(70 нм/500 нм/4–6 мкм)+20 % Ti;
3. (h)BN+20 %Fe, (h)BN+20 %Cu, (h)BN+20 %Ni; (c)BN+20 %Fe, (h)BN+20 %Cu, (h)BN+20 %Ni.

В результате синтеза вторичных веществ происходило изменение массы всех исходных смесей. Наибольшее увеличение происходило в смеси с cBN+20%Ti+карборан.

В двух смесях происходил фазовый переход. В результате воздействия гиротронного разряда на порошок кубического нитрида бора в смеси с титаном и водородосодержащей добавкой $B_{10}H_{10}(Et_3NH)_2$ происходило полное изменение структуры исходного порошка и увеличение выхода материала на стенки и дно подложки. При помощи рамановской спектроскопии были обнаружены гексагональные структуры (h) (Рис. 1).

Анализ РФА показал, что фазовый переход происходил в смеси

с сBN + 20 %Cu. В данном случае пробой наблюдается в режиме 400 кВт/8 мс.

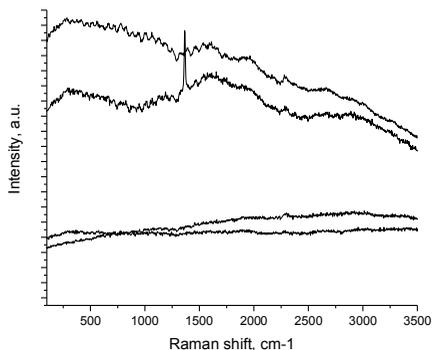


Рис. 1. Спектры hBN после синтеза смеси порошка сBN+20 %Ti + 0.026 г $B_{10}H_{10}(Et_3NH)_2$

Данный переход соответствует правилу «ступенчатых переходов» Оствальда: при любом процессе сначала возникает не наиболее устойчивое состояние с наименьшей свободной энергией, а наименее устойчивое и наиболее близкое по величине свободной энергии к исходному состоянию.

Таким образом, было выяснено, что карборан и другие водородосодержащие добавки в смесях с нитридом бора и металлами способствуют горению смеси и увеличивают выход материала на стенки и дно подложки. Было выяснено, что при определённых режимах работы гиротрона и соответствующем составе смеси исходного порошка происходит переход из кубической фазы нитрида бора в гексагональную [1]. В результате синтеза происходило полное изменение структуры порошковых смесей с увеличением массы.

Авторы выражают благодарность Скворцовой Нине Николаевне. Работа выполнена в рамках госзадания ГЗ БВ10–2022 «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

1. Schütt F., Zapf M., Signetti S. et al. Nat. Commun. 2020, **11**, 1437.
2. Corso M., Awarter W., Muntwiler M. et al. Science. 2004, **303**(5655), 217–220.
3. Skvortsova N.N., Shishilov O.N., Akhmadullina N.S. et al. Ceramics International. 2021, **47**(3), 3978–3987.

Особенности формы завершеного скользящего разряда в диапазоне давлений от 10 до 30 торр

Грудиев Е.И.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: gnarus08@yandex.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-103-104

Скользящий по поверхности диэлектрика разряд нашел широкое применение в плазмохимии, в организации воспламенения и горения, предыонизации лазерных смесей, а также актуален в задачах разработки плазменных актуаторов. Исследования в области использования скользящего разряда лежат преимущественно области давлений порядка 1 атм и выше. Однако интерес могут представлять также и характеристики разряда в диапазоне давлений 10–30 торр, которые освещены недостаточно подробно [1].

Проведены исследования особенностей изменения формы сильноточного плазменного канала на поверхности диэлектрика толщиной 1,5 мм (сапфир) при варьировании внешних условий: давления рабочего газа (воздух) и напряжения (до 12 кВ). Частота следования импульсов питания 200 Гц. Ширина инициирующего электрода 5 мм. Длина межэлектродного промежутка 6 см.

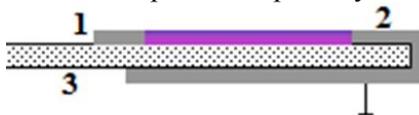


Рис. 1. Схема электродов. 1 — инициирующий электрод, 2 — заземленный электрод, 3 — твердый диэлектрик (сапфир).

В диапазоне давлений от 10 до 30 торр получены пороговые характеристики зажигания сильноточного поверхностного разряда. Показано, что время замыкания электродов изменяется случайным образом от импульса к импульсу в пределах от нескольких микросекунд до десятков микросекунд.

При давлении 10–15 торр поверхностный разряд при напряжении от 5 до 7 кВ переходит в дугу. При давлениях >15 торр при увеличении напряжения полного перехода поверхностного

разряда в дуговую форму не происходит. Осуществляется режим, при котором часть разряда распространяется по поверхности диэлектрика, а в центральной области разряда образуется дуга малого размера. При дальнейшем увеличении напряжения до 8 кВ и выше разряд снова переходит в поверхностную форму. Следует отметить, что в каждом из приведенных режимов обеспечивается стабильная повторяемость разряда.



Рис. 2. Режимы разряда при давлении 16 торр:

а) 5.5 кВ, б) 6.5 кВ, в) 7.5 кВ, г) 8 кВ.

Частота 200 Гц. Экспозиция 1/400 с.

Отличные от приведённых выше результаты исследовались в работе [2] в случае, когда форма разряда изменялась с увеличением частоты. Увеличивая частоту в пределах до 1 кГц, возможно добиться перехода в дугу обеих форм разряда.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Кузьмину Г.П., д.т.н. Минаеву И.М. и н.с. Тихоновичу О.В. за помощь в проведении экспериментов и полезные обсуждения.

1. Andreev S.I., Zobov E.A. et al. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1980, **1**, 111–115.
2. Grudiev E.I. Прохоровские недели. Тезисы докладов. 2021, 79–81.

Воздействие прямого пьезоразряда на состав воды Milli-Q

Гудкова В.В.^{1,2}, Разволяева Д.А.^{1,2}, Борзосекос В.Д.¹

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

*2- Институт физических исследований и технологий
Российский университет дружбы народов, Москва*

E-mail: safel1980@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-105-107

В настоящее время широкомасштабно развиваются исследования, посвященные применению низкотемпературной плазмы неравновесного разряда атмосферного давления в широком спектре задач сельскохозяйственной и медико-биологической направленности: обработка поверхностей для их дезинфекции, лечение кожных заболеваний, очистка сточных вод, увеличение всхожести семян, плазменная активация воды и её дальнейшее применение к биологическим объектам и т. д. [1]. Большинство применений неравновесных разрядов при атмосферном давлении основано на их уникальной плазмохимии [2].

В данной работе исследуется активация воды Milli-Q низкотемпературной плазмой прямого пьезоразряда в воздухе при атмосферном давлении. Параметры плазмы и её источник, созданный на основе пьезотрансформатора, описаны в [3]. В процессе обработки воды плазмой в ней образуются растворённые реактивные кислород- и азотсодержащие частицы, которые можно разделить на короткоживущие и долгоживущие.

Целью данной работы было измерение концентраций долгоживущих реактивных кислород- и азотсодержащих частиц: пероксида водорода H_2O_2 , нитрит-иона NO_2^- и нитрат-иона NO_3^- . Также важен анализ изменения кислотности среды и окислительно-восстановительного потенциала. Измерения концентраций нарабатываемых частиц производились с помощью двух методов — фотоколориметрии и абсорбционной УФ-диагностики.

Вода Milli-Q объёмом 5 мл помещалась в луночный планшет. Обработка воды производилась низкотемпературной плазмой прямого пьезоразряда в течение 2, 4, 6 и 8 минут.

Методом фотоколориметрии проводились измерения концентрации пероксида водорода и нитрит-ионов с помощью спектрофотометра Cintra 4040 УФ-видимого диапазона излучения (185–900 нм) с разрешением 0.1 нм. Диагностика пероксида водорода производилась при добавлении в обработанную воду реактива FOX (1:1 с учетом разбавления) [4], нитрит-ионов – при добавлении раствора на основе порошка Грисса (100 мкл на 2 мл обработанной воды) [5]. Оптическая плотность пероксида водорода измерялась на длинах волн 540–570 нм, а нитрит-ионов — на 520–540 нм. Расчёт концентрации нарабатываемых частиц производился по калибровочным кривым для известных концентраций с учетом закона Бугера-Ламберта-Бера.

Методом абсорбционной УФ-диагностики производились измерения концентраций H_2O_2 , NO_2^- и NO_3^- . Обработанная вода помещалась в кварцевую кювету (КУ-кварц). Через кювету пропускался пучок УФ-излучения от ксеноновой лампы Avalight-XE-HP (200–1000 нм). В качестве приемника УФ-излучения использовался спектрометр AvaSpec-Mini4096CL (200–460 нм). Для спектра сравнения в кювету помещалась исходная чистая вода Milli-Q. Спектры поглощения обработанной воды раскладывались в диапазоне 200–300 нм на составляющие: спектры поглощения чистых растворов каждой из частиц H_2O_2 , NO_2^- и NO_3^- с известными концентрациями. При процедуре разложения рассматривается система линейных уравнений, решением которой будут концентрации частиц.

В ходе эксперимента наблюдался рост концентрации пероксида водорода H_2O_2 с выходом на плато с учетом погрешности измерений при обработке более 6 минут (рис. 1а).

Концентрация нитрит-ионов увеличивается при малых временах обработки, затем нитрит-ионы NO_2^- окисляются и преобразуются в нитрат-ионы NO_3^- (рис. 1б). При этом водородный показатель среды уменьшается, а окислительно-восстановительный потенциал увеличивается. В совокупности это позволяет сделать вывод о слабых буферных свойствах воды Milli-Q.

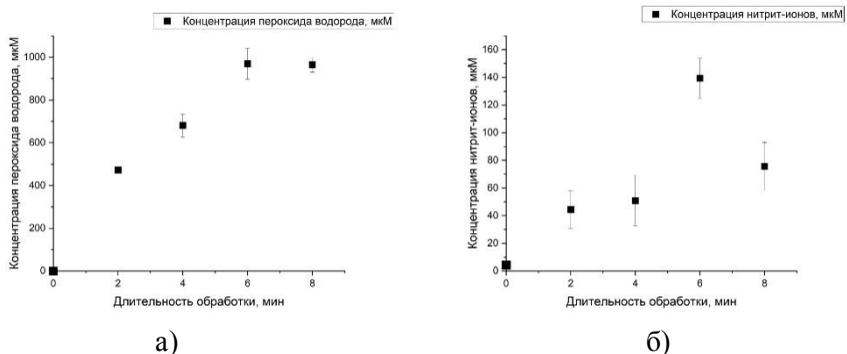


Рис. 1. Зависимость концентрации пероксида водорода H_2O_2 (а) и нитрит-ионов NO_2^- (б) в воде Milli-Q от длительности обработки низкотемпературной плазмой прямого пьезоразряда.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра биофотоники ИОФ РАН Артемьеву К.В., Кончехову Е.М., а также сотруднику отдела физики плазмы ИОФ РАН Павлик Т.И. за помощь в проведении экспериментов и анализе результатов.

1. Reuter S. et al. J. Phys. D: Appl. Phys. 2018, **51**, 233001.
2. Bruggeman P.J. et al. Plasma Sources Sci. Technol. 2017, **26**, 123002.
3. Kolik L.V. et al. Russian Physics Journal. 2020, **62**(11), 2073–2080.
4. Gay C., Gebicki J.M. Anal Biochem. 2004, **284**, 217–220.
5. Tsikas D. J. Chromatogr. B Analyt. Technol. Biomed. Life Sci. 2007, **851**, 51–70.

Электродинамика поверхностной волны, поддерживающей плазменный столб в сантиметровом диапазоне радиоволн

Жуков В.И.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: zhukov.vsevolod@physics.msu.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-108-109

В работе исследуются электромагнитные поверхностные волны (ПЭВ), самосогласованно распространяющиеся на плазменном столбе газового разряда в сантиметровом диапазоне радиоволн [1]. Изучение структуры поверхностной волны представляется целесообразным проводить в режиме стоячих волн. Стоячая волна формировалась в резонаторе ПЭВ открытого типа, между двух плоскопараллельных металлических зеркал. Эксперименты проводились в самосогласованном режиме: возбуждалась стоячая поверхностная волна, которая сама создавала и поддерживала плазму. Возбуждение стоячей волны позволило независимо исследовать продольную и поперечную компоненты вектора напряженности электрического поля ПЭВ. Как известно [2], данные компоненты поля ПЭВ сдвинуты по фазе на 90° друг относительно друга.

Разряд, поддерживаемый поверхностной волной (рис. 1), осуществлялся в трубках (1) длиной 2 м, радиусом от 5 до 14 мм. Поверхностная волна возбуждалась волноводным аппликатором (2), питаемым магнетроном (3) мощностью 700 Вт, работающим на частоте 2.45 ГГц. Структура ПЭВ исследовалась при возбуждении разных мод. Так, при выполнении условия [3] $fr < 2$ ГГц \times см, где f — частота электромагнитного излучения, а r — радиус трубки, на плазменном столбе возбуждается только аксиально-симметрическая $m = 0$ мода ПЭВ. Конструкция волноводного аппликатора позволяет селективировать также $m = 1$ дипольную моду ПЭВ [4] при выполнении $fr > 2$ ГГц \times см.

Показано, что возбуждение стоячей волны на длинном плазменном столбе приводит к формированию локальных минимумов и максимумов плотности плазмы на всей его длине,

период которых равен половине длины поверхностной волны. Причем профиль плотности плазмы в значительной степени определяется структурой поля возбуждаемой моды ПЭВ. Показана возможность создания плазменного столба с модуляцией плотности плазмы, достигающей $n_{\max}/n_{\min} \approx 5$, и длиной около 10 длин волн. С помощью численной модели исследована структура поля поверхностной волны как внутри, так и вне плазмы. Численное моделирование и эксперимент позволили определить характерные отличия структуры поля $m = 0$ и $m = 1$ мод. Показано, что с ростом концентрации электронов доля энергии ПЭВ в плазме падает, а профиль плотности становится сильно неоднородным с провалом в центре трубки.

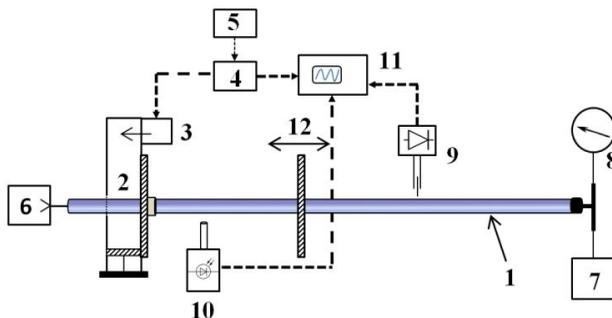


Рис. 1. Схема эксперимента.

- 1 — кварцевая трубка; 2 — волноводный аппликатор; 3 — магнетрон;
4 — модулятор; 5 — генератор импульсов; 6 — форвакуумный насос;
7 — натекатель; 8 — вакуумметр; 9 — СВЧ четвертьволновая антенна;
10 — коллимированный фотодетектор; 11 — осциллограф;
12 — подвижное медное зеркало.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90162.

1. Moisan M., Shivarova A., Trivelpiece A.W. J. Plasma Phys. 1982, **24**(11), 1331–1400.
2. Rakem Z., Leprince P., Marec J. Rev. Phys. Appl. (Paris). 1990, **25**(1), 125–130.
3. Zhelyazkov I., Atanassov V. Physics Reports. 1995, **255**(2–3), 79–201.
4. Жуков В.И., Карфидов Д.М., Сергейчев К.Ф. Физика плазмы. 2020, **46**(8), 1–9.

Амбиполярная диффузия газоразрядной плазмы в магнитном поле

Потапов А.А., Швачко А.А.

*Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А., Саратов.*

E-mail: potapov_andrey13@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-110-112

Плазменные приборы имеют широкое научно-техническое применение — плазмотроны, газовые лазеры, газоразрядные датчики, плазменные телевизионные экраны. При проектировании таких приборов требуются знания основных характеристик такой плазмы. Амбиполярная диффузия является важным параметром, характеризующим движение носителей заряда в плазме. Этот параметр позволяют описать движение электронов и ионов в плазме за большие времена при наличии магнитного поля и без него [1]. При отсутствии магнитного поля или в слабом магнитном поле электроны, как более подвижные частицы, вырываются вперед при движении плазмы, образуется некомпенсированный положительный заряд ионов, или, более точно, вблизи стенок образуется двойной слой зарядов. Возникающее при этом электрическое поле (амбиполярное) тормозит электроны и ускоряет ионы. При величине магнитной индукции, при которой коэффициенты подвижности электронов и ионов оказываются равными, коэффициенты диффузии заряженных частиц вблизи диэлектрических стенок также выравниваются. Учитывая это, можно предположить, что при таких магнитных полях отрицательный заряд на стенке равен нулю, следовательно, амбиполярное электрическое поле отсутствует. Величину амбиполярной диффузии характеризует коэффициент амбиполярной диффузии, для определения которого необходимо знать:

$$b_e^B = b_e \left(1 + b_e^2 B^2\right)^{-1}, \quad (1)$$

$$b_p^B = b_p \left(1 + b_p^2 B^2\right)^{-1}, \quad (2)$$

$$D_e^B = D_e \left(1 + b_e^2 B^2\right)^{-1}, \quad (3)$$

$$D_p^B = D_p (1 + b_p^2 B^2)^{-1}, \quad (4)$$

где b_e , b_p , D_e , D_p — соответственно коэффициенты подвижности и диффузии электронов и положительных ионов в отсутствии магнитного поля B [2].

b_e^B , b_p^B , D_e^B , D_p^B — соответствующие параметры плазмы в магнитном поле.

Выражение для коэффициента амбиполярной диффузии, который совместно описывает диффузионное движение электронов и положительных ионов в магнитном поле, имеет вид:

$$D_{am}^B = \frac{(D_e^B b_p^B + D_p^B b_e^B)}{b_e^B + b_p^B}. \quad (5)$$

На рис. 1 представлен график зависимости коэффициентов диффузии электронов и ионов, а также коэффициента амбиполярной диффузии, от величины магнитного поля в неоновой плазме при давлении 1 мм. рт. ст.

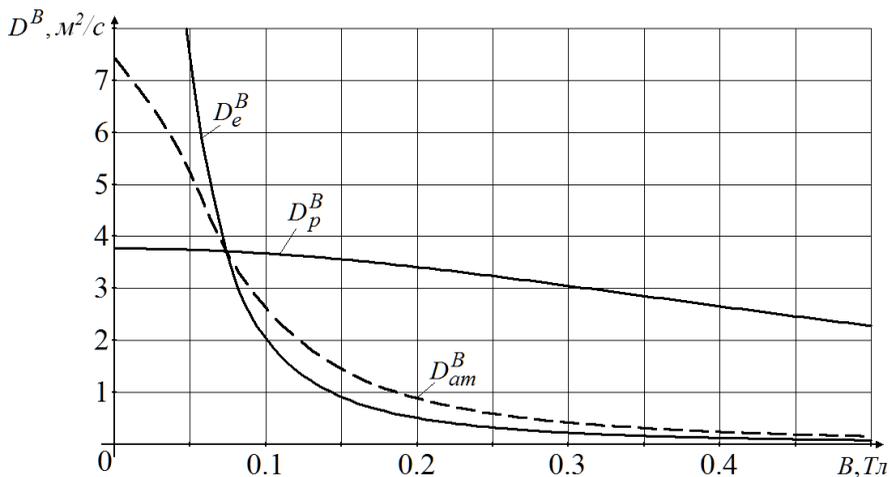


Рис. 1. График зависимости коэффициентов диффузии носителей заряда от величины магнитного поля в неоновой плазме при давлении 1 мм. рт. ст.

Из рис. 1 следует, что коэффициент амбиполярной диффузии

значительно меньше коэффициента диффузии электронов, но больше коэффициента диффузии положительных ионов. Физически это означает, что магнитное поле объемного заряда оказывает тормозящее действие на диффузионное движение электронов и ускоряющее — для положительных ионов.

1. Erofeev A.V., Lapushkina T.A., Poniaev S.A. IEEE Transactions on Plasma Science. 2014, **42**(10), 2548–2549.
2. Bankovsky A.S., Zaharov A.A., Vlasova Y.A., et al. 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 2016, pp. 1–8.

Действие обработанного холодной плазмой раствора Хенкса на генерацию TGF- β мононуклеарными лейкоцитами человека

Павлик Т.И.¹, Разволяева Д.А.^{1,2}, Гудкова В.В.^{1,2}

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

*2- Институт физических исследований и технологий
Российский университет дружбы народов, Москва*

E-mail: darzvlv@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-113-115

В последние годы все больший интерес вызывает применение холодной плазмы атмосферного давления при лечении онкологических заболеваний [1].

Данный вид плазмы представляет собой частично ионизированный газ, генерирующий различные активные формы кислорода и азота, которые оказывают терапевтическое действие при нанесении на клетки и ткани либо непосредственно прямым воздействием плазмы, либо через воздействие растворов, которые были обработаны предварительно с использованием плазменных процессов. Действительно, реактивные виды, генерируемые разрядом, могут воздействовать на сигнальные пути внутри регенерированных клеток, что влияет на их биологическую активность, вызывая пролиферацию клеток или апоптоз [2].

В многочисленных работах наблюдается синергизм противоопухолевого действия при одновременном использовании холодной плазмы и цитотоксических препаратов [3]. Такой результат может быть связан с участием TGF- β — цитокина, регулирующего пролиферативные процессы, которые ускоряют рост опухоли. Поэтому в настоящее время анти-TGF- β -терапия является одним из активно развивающихся направлений при лечении опухолей.

В данной работе изучалось изменение уровня TGF- β в клетках, подвергнутых воздействию обработанного холодной плазмой раствора Хенкса.

Целью исследования являлось измерение концентраций долгоживущих активных форм кислорода и азота: пероксида

водорода (H_2O_2) и нитрит-иона (NO_2^-), кислотности водного раствора и окислительно-восстановительного потенциала для определения способности компонентов раствора к восстановлению, а также концентрации TGF- β в питательной среде RPMI после инкубации мононуклеарных лейкоцитов.

В данной работе использовался компактный источник низкотемпературной плазмы (прямого пьезоразряда), разработанный в ИОФ РАН [4, 5].

В течение 30 мин после обработки раствора Хенкса источником холодной плазмы были измерены концентрации пероксида водорода и нитрит-ионов с помощью фотометрических методов. Концентрация пероксида водорода возростала прямо пропорционально длительности обработки, в то время как концентрация нитрит-ионов резко увеличилась при малом времени обработки, а после сохранялась при дальнейшем воздействии разряда.

Для полноты исследования мы также измеряли изменения кислотности водного раствора и окислительно-восстановительный потенциал для определения способности компонентов раствора к восстановлению. Раствор Хенкса при любом времени обработки холодной плазмой (2.5, 5, 7.5 мин) сохраняет нейтральную кислотность ($pH = 7.6 \pm 0.5$), что говорит о его сильных буферных свойствах, благодаря чему он может использоваться в медицинских целях.

Биологическим объектом исследования служили мононуклеарные лейкоциты человека (6 доноров обоих полов, возраст от 20 до 45 лет), которые в течение суток находились в питательной среде с добавлением обработанного холодной плазмой раствора Хенкса (PTS) или растворов нитритов и пероксида водорода. Концентрация TGF- β определялась при помощи иммуноферментного анализа.

Исследования показали чёткую зависимость концентрации TGF- β от времени обработки (рис. 1). При большом времени обработки раствора Хенкса (7.5 мин) TGF- β вырабатывается больше, чем в контрольных образцах, а при средних и малых временах обработки (5 и 2.5 мин) TGF- β вырабатывается меньше, чем в контрольных образцах. Замена PTS аналогичными растворами пероксида водорода или пероксида водорода и нитритов не даёт

такой зависимости.

Полученный результат может объяснить такие разные эффекты растворов, обработанных холодной плазмой, как увеличение пролиферации и подвижности фибробластов при заживлении ран и цитостатический и цитотоксический эффект по отношению к опухолевым клеткам. Так как при всех трёх экспериментальных временах обработки концентрация нитритов была одинаковой, можно сделать вывод, что цитокиновая активность лейкоцитов зависит от дозы пероксида водорода при обязательном присутствии нитритов в химически активном состоянии.

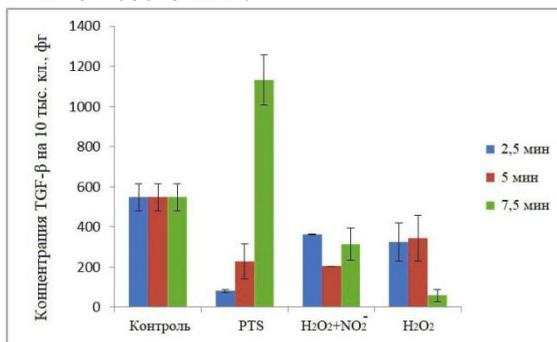


Рис. 1. Концентрация TGF-β в питательной среде RPMI после инкубации мононуклеарных лейкоцитов.

Авторы выражают благодарность сотруднику Центра биофотоники ИОФ РАН Кончечкову Е.М. за помощь в проведении экспериментов.

1. Walk R.M., Snyder J.A., Srinivasan P., et al. *J. Pediatr. Surg.* 2013, **48**, 67–73.
2. Bauer G., Sersenova D., Graves D.B. & Machala Z. *Sci. Rep.* 2019, **9**, 14210.
3. Li Y., Tang T., Lee H.J., et al. *Int. J. Mol. Sci.* 2021, **22**(8), 3956.
4. Kolik L.V. et al. // Patent RU №181459. 2018. Bul. № 20.
5. Артемьев К.В., Богачев Н.Н., Гусейн-заде Н.Г., и др. *Известия высших учебных заведений. Физика.* 2019, **62**(11), 105–111.

Некоторые особенности и различия токовых слоев, формируемых в 2D и 3D магнитных конфигурациях

Харлачев Д.Е., Кирий Н.П., Франк А.Г.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: harlachdanila@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-116-118

Эксперименты, проводимые в лаборатории, помогают в изучении и понимании физики космической плазмы, при этом без существенных трудностей, которые имеются при использовании космических аппаратов. Лабораторные эксперименты проводятся в хорошо контролируемых условиях с применением современных методов диагностики плазмы, позволяют моделировать и изучать такие явления, как солнечные и звёздные вспышки, суббури в магнитосфере Земли и других планет, неустойчивости срыва в плазме токамаков. Эти явления связаны с токовыми слоями в плазме и магнитным пересоединением в них [1]. Токовые слои, формируемые в двумерной и трёхмерной магнитных конфигурациях, существенно отличаются между собой. В реальных объектах в космосе и в установках для создания и удержания плазмы магнитные поля, как правило, являются трехмерными (3D). В частности, такие эксперименты по изучению динамики токовых слоев и магнитного пересоединения проводятся в ИОФ РАН при помощи установки ТС-3D [2].

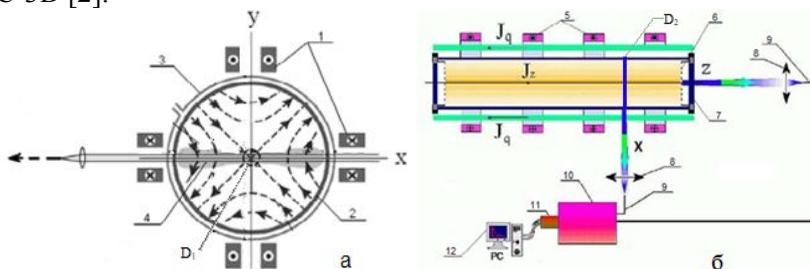


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ТС-3D (ИОФ РАН).

Была изучена динамика нейтральной компоненты плазмы токового слоя, сформированного в 2D и 3D магнитных

конфигурациях, при разряде в гелии. Измерены уширения спектральной линии атомов гелия I 5876 \AA , излучаемой плазмой токового слоя, сформированного в 2D и 3D магнитных конфигурациях. С помощью отработанной методики были определены температура и энергия направленного движения атомов гелия, и получены зависимости этих величин от времени, представленные на рис. 2, что позволило изучить некоторые различия в токовых слоях, сформированных в разных магнитных конфигурациях. Там же показаны зависимости плотности электронов в центре токового слоя $N_e^0 = f(t)$ и на краях слоя $N_e^X = f(t)$, полученные в работе [3].

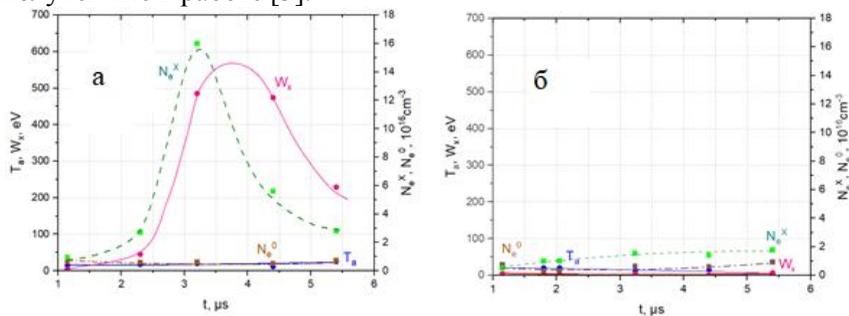


Рис. 2. Эволюция во времени температуры T_a и энергии направленного движения атомов гелия W_x , а также концентрации электронов в центральной области токового слоя N_e^0 и на его краях N_e^X . Условия эксперимента: $J_z^{\text{max}} = 45 \text{ кА}$, $h = 0.5 \text{ кГс/см}$; $p = 320 \text{ мТорр}$, (а) $B_z = 0$; (б) $B_z = 2.9 \text{ кГс}$.

Таким образом, было обнаружено, что в 2D магнитной конфигурации уширение линии He I 5876 \AA , измеренное в x-направлении, больше уширения той же линии в z-направлении в ~ 7 раз. В трехмерной магнитной конфигурации разница между уширениями ~ 1.2 раза. В 2D магнитной конфигурации энергия направленного движения атомов гелия в процессе эволюции токового слоя быстро увеличивается и к моменту времени $t \approx 3.2 \text{ мкс}$ достигает величины $W_x \approx 480 \pm 120 \text{ эВ}$, что в 20 раз превосходит температуру атомов гелия в этот же момент времени, $T_a \approx 20 \pm 2 \text{ эВ}$. При формировании токового слоя в трехмерной магнитной конфигурации направленного движения атомов гелия не наблюдается.

1. Syrovatskii S.I. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1981, **19**, 163–229.
2. Франк А.Г. *УФН*, 2010, **180**, 982–988.
3. Кирий Н.П., Франк А.Г. *Физика плазмы*, 2022. В печати.

ФИЗИКА В БИОЛОГИИ, МЕДИЦИНЕ, СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ И ЭКОЛОГИИ

Оптическая когерентная томография как метод интраоперационной нейрودиагностики глиом головного мозга

**Александрова П.В.^{1,2}, Алексеева А.И.³, Никитин П.В.⁴,
Зайцев К.И.¹, Долганова И.Н.²**

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва.*

*2- Институт физики твёрдого тела им. Ю.А. Осипьяна
Российской академии наук, Черноголовка.*

*3- Научно-исследовательский институт морфологии человека
им. Академика А.П. Авцына, Москва.*

4- Сколковский институт науки и технологий, Москва.

E-mail: aleksandrovapolina98@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-119-121

Оптическая когерентная томография (ОКТ) — это высокоразрешающий неинвазивный метод визуализации внутренней структуры исследуемой ткани, чаще всего применяемый в биомедицинской оптике и медицине [1]. Одно из перспективных применений ОКТ — интраоперационная диагностика новообразований, в частности, опухолей головного мозга, и определение их границ [2, 3]. Данная работа посвящена анализу различных физических признаков, извлеченных из ОКТ-сигнала, и параметров ОКТ-изображений, а также оценке возможности дифференциации между опухолевыми и здоровыми тканями головного мозга на их основе. В представленной работе также проводился анализ информации, полученной из изображения спекл-структур ОКТ при помощи оценки контрастности, распределения яркости спекл-структур и вейвлет-анализа изображений этих структур.

Применяемая система ОКТ [4] содержит источник излучения с рабочей длиной волны 1.3 ± 0.13 мкм и формирует двумерные изображения с глубиной сканирования ~ 1.8 мм и размером 256×400 пикселей. Пространственное разрешение в поперечном измерении и

по глубине составляют 50 мкм (в воздухе) и 25 мкм, соответственно.

Набор анализируемых признаков включал в себя коэффициент ослабления (рис. 1), описывающий рассеивающие и структурные свойства тканей, а также его стандартное отклонение σ_μ . Их значения были получены из ОКТ-сигналов от образцов тканей *ex vivo* головного мозга крыс и модели глиомы 101.8. Для анализа спектров были построены гистограммы распределения яркости изображения спеклов, и проведена их аппроксимация стандартным гамма-распределением с последующим извлечением параметров формы и масштаба соответственно (рис. 2), а также был проведен вейвлет-анализ изображений спеклов при помощи биортогонального вейвлета *rbio3.5*, и получены значения мощности локальных флуктуаций яркости в спекле ОКТ с учетом их масштаба.

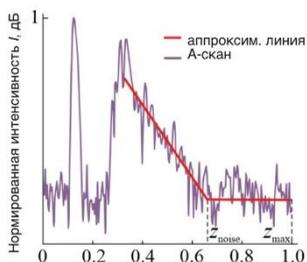


Рис. 1. Пример ОКТ-сигнала и извлечения коэффициента ослабления.

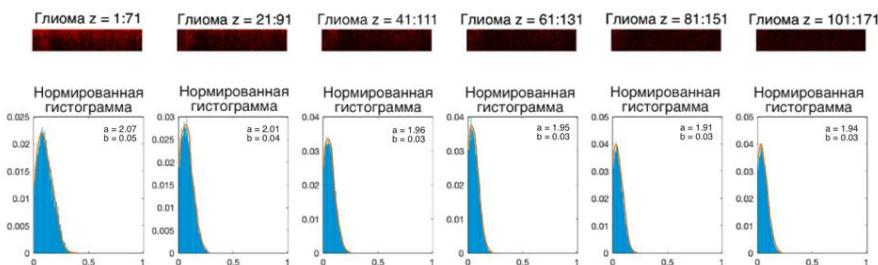


Рис. 2. Гистограммы распределения яркости спеклов и их аппроксимация функцией плотности вероятности гамма-распределения.

Для дифференциации тканей использовался линейный дискриминантный анализ Фишера, а также проводилась оценка чувствительности и специфичности (рис. 3).

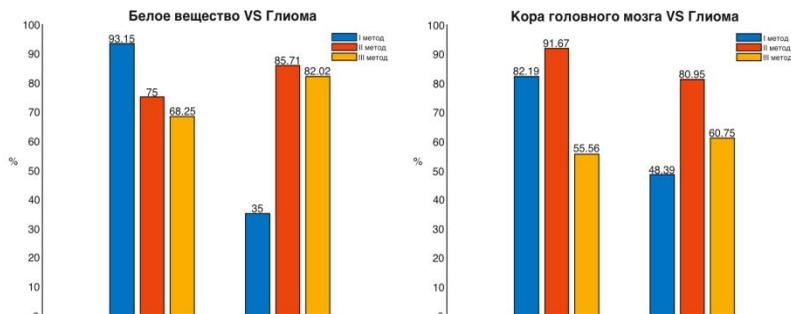


Рис. 3. Распределение значений чувствительности Se и специфичности Sp для всех рассмотренных методов.

В ходе работы был сделан вывод о том, что комбинация методов анализа показателя ослабления и распределения яркости спекл-структур может быть использована в качестве метода дифференциации тканей головного мозга при помощи ОКТ. В то же время эффективность метода анализа вейвлет-преобразования спекл-структур значительно снижается для коры головного мозга, а для белого вещества сравнима с методом распределения яркости спеклов.

1. V.V. Tuchin Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnostics, 3rd ed., SPIE Press, 2015.
2. Phuphanich S., Ferrall S., and Greenberg H. J. Florida Medical Association, 1993, **80**, 181–184.
3. Dolganova I.N., Aleksandrova P.V., Nikitin P.V., et al. Biomed. Opt. Exp. 2020, **11**(11), 6780–6798.
4. Gelikonov V.M., Gelikonov G.V., Gladkova N.D., et al. JETP Lett., 1995, **61**, 158–162.

Исследование режимов работы терагерцового микроскопа на основе эффекта твердотельной иммерсии

Желнов В.А.

*Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: vleder.zel@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-122-124

На протяжении последних десятилетий терагерцовый (ТГц) диапазон электромагнитного излучения активно применялся для проведения исследований специалистами в различных областях науки и техники. Так, например, ТГц визуализация и спектроскопия нашла применение в биофотонике и медицинской диагностике [1–3], неразрушающем контроле композитных материалов и керамики [4, 5]. Однако до сих пор остаётся актуальной проблема относительно низкого пространственного разрешения традиционных ТГц фокусирующих элементов из-за большой длины волны ТГц излучения. Она имеет особое значение в некоторых областях применения ТГц техники, таких как медицинская диагностика, так как размеры некоторых структурных элементов биологических тканей существенно меньше длины волны ТГц излучения [1].

Решением этой проблемы является разработка ТГц изображающей системы на основе эффекта твердотельной иммерсии, который заключается в уменьшении размеров каустики пучка в случае, когда он фокусируется на малом расстоянии позади среды с высоким показателем преломления [6]. Однако для практической реализации данного метода важно знать характер зависимости пространственного разрешения от оптических свойств исследуемого объекта.

Оптические свойства исследуемого объекта (показатель преломления n_{obj} и коэффициент поглощения α_{obj}) влияют на пространственное разрешение ТГц системы на основе эффекта твердотельной иммерсии. Для теоретического исследования зависимости разрешения от оптических свойств объекта используются данные, полученные при помощи численных методов конечных разностей во временной области (FDTD – Finite Differences

in Time Domain) [7] и конечных элементов в частотной области (FEFD – Finite Elements in Frequency Domain) [8]. Для экспериментального подтверждения численных результатов использовался набор тестовых объектов со ступенчатым профилем коэффициента отражения, изготовленных из различных ТГц оптических материалов с априорно известными оптическими свойствами. Эксперименты проводились на экспериментальном макете ТГц микроскопа на основе эффекта твердотельной иммерсии [6, 9].

На рис. 1 продемонстрирована экспериментальная оценка пространственного разрешения как функции показателя преломления образца n_{obj} . Также здесь показаны численные данные 2D-FDTD моделирования и результаты численного анализа ТГц изображающей системы, выполненного с использованием квази-3D метода FEFD в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Численные данные даны в точках, соответствующих оптическим свойствам тестовых образцов.

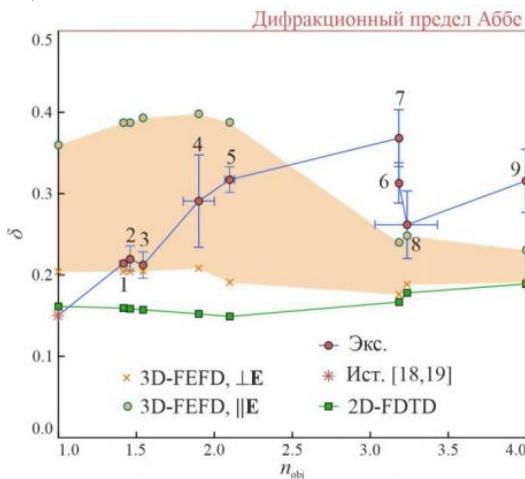


Рис. 1. Сравнение экспериментально оцененного (красные кружки) и численно предсказанного (с использованием 2D-FDTD и квази-3D-FEFD – зеленые квадраты и оранжевая область, соответственно) пространственного разрешения δ ТГц микроскопа на основе эффекта твердотельной иммерсии.

Можно заметить хорошее соответствие между

экспериментальными и численными данными, а именно, оба показывают сильно субволновое разрешение ТГц микроскопа за пределами дифракционного предела Аббе в свободном пространстве. Экспериментально измеренное разрешение находится в диапазоне $\delta \approx 0.15-0.4$ для всех измеренных образцов, которые представляют различные режимы работы ТГц изображающей системы: режим полного внутреннего отражения $1.0 \leq n_{obj} \leq 2.2$ и обыкновенный режим отражения ($n_{obj} > 2.2$), в котором также можно выделить ещё два режима – отрицательный ($2.2 < n_{obj} \leq n_{Si}$) и положительный ($n_{Si} < n_{obj}$) диэлектрический контраст [9].

Автор выражает благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Черномырдину Н.В. и к.ф.-м.н. Зайцеву К.И. за постановку научной задачи, помощь в моделированиях и экспериментальных изменениях, а также обсуждение результатов.

1. Smolyanskaya O.A. et al. Prog. Quantum Electron., 2018, **62**, 1–77.
2. Zaytsev K.I. et al. J. Opt., 2020, **22**(1), 013001.
3. Gavidush A.A. et al. J. Biomed. Opt., 2019, **24**(2), 027001
4. Stoik C.D., Bohn M.J., Blackshire J.L. Opt. Express, 2008, **16**(21), 17039-17051.
5. Lopato P. Appl. Sci., 2017, **7**(7), 661.
6. Chernomyrdin N. V. et al. Appl. Phys. Lett., 2018, **113**(11), 111102.
7. Schneider J. Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House antennas Propag. Libr., 2005.
8. Stamnes K. et al. Appl. Opt., 1988, **27**(12). 2502.
9. Zhelnov V.A. et al. Opt. Express, 2021, **29**(3), 3553-3566.

**Исследование гемо- и лимфодинамики
в процессе заживления лазерной раны на коже мыши**
**Копьева М.С.^{1,2}, Филатова С.А.¹, Новокрещенов П.В.²,
Пушкарь И.М.², Камынин В.А.¹**

1- *Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

2- *Российский университет дружбы народов, Москва*

E-mail: mashutka_kopyova@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-125-127

Лазерные системы с длиной волны 2–2.1 мкм широко распространены в таких областях медицины, как хирургия, урология и дерматология [1]. Это можно объяснить наличием пика поглощения воды в двухмикронном спектральном диапазоне [2]. Лазерное воздействие на биологические ткани сопровождается локальным нагревом, структурными и функциональными изменениями. Поэтому контроль этих изменений во время и после лазерного воздействия является приоритетной задачей.

Эксперименты *in-vivo* по лазерному разрезанию кожи проводились на 45 мышах-самцах. В качестве источника непрерывного излучения использовался полностью волоконный гольмиевый лазер с длиной волны 2.1 мкм [3]. Выходное излучение мощностью 0.3, 1 и 1.5 Вт подавалось через одномодовое волокно и фокусировалось на поверхность кожи. На протяжении всего эксперимента мышь была обездвижена путем внутривентрального введения анестезирующего препарата (Золетил 100) и закреплена на подвижный столик. Скорость резания регулировалась скоростью движения столика: 0.25 и 1 мм/с. Для оценки показателей микроциркуляции в режиме реального времени использовался неинвазивный метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Измерения проводились с помощью анализатора "ЛАЗМА" в двух точках: 1 — место повреждения, 2 — на расстоянии 5 мм от повреждения. Оценивали среднее арифметическое значение показателя микроциркуляции (M) и среднее квадратическое отклонение (σ) в перфузионных единицах (пф. ед.). Вазомоторную микрососудистую активность оценивали с помощью коэффициента



вариации K_v .

Сравнение средних значений показателей микроциркуляции крови проводилось после воздействия непрерывным излучением сразу после воздействия (0 сутки) на 3, 10 и 21 сутки с показателями контрольной группы. Значения показателей кровотока у интактных мышей составили $M = 17 \pm 4$ пф. ед, $\sigma = 3.13 \pm 1$ пф. ед, $K_v = 18.4 \pm 2$ %. Данные показателей микроциркуляции крови в разные временные интервалы представлены на рис. 1.

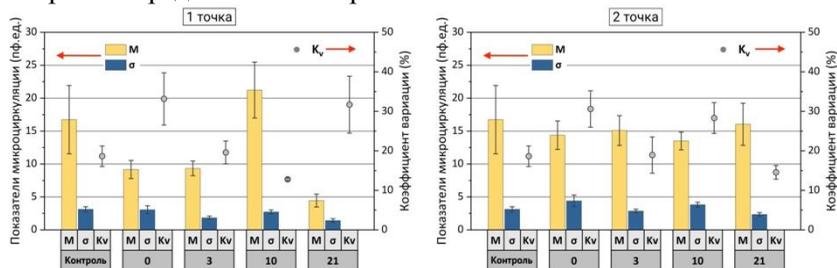


Рис. 1. Динамика показателей микроциркуляции крови в точках измерения 1 и 2 после воздействия непрерывным лазерным излучением мощностью 1.5 Вт. Скорость резания 0.25 мм/с.

В точке 1 мы наблюдаем уменьшение перфузии кровотока. Так, индекс M снизился на 46 %, σ уменьшился на 3 % по сравнению с нормой, что свидетельствует о спазме в капиллярах и снижении их кровенаполняемости. В отличие от измерений в точке 2, где показатель M незначительно уменьшился и к 21 суткам восстановился до уровня нормы.

В тканях, подвергнутых воздействию лазерного излучения, наблюдалось снижение капиллярного кровотока при всех значениях мощности. Полученные данные позволят прогнозировать процесс заживления тканей.

Авторы выражают благодарность д.м.н., профессору кафедры анатомии человека Медицинского факультета РУДН Асташову В.В., а также научному руководителю д.ф.-м.н. Цветкову В.Б. за помощь в обсуждениях полученных результатов.

Работа выполнена на базе Научного центра мирового уровня «Фотоника» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ 075-15-2020-912).

1. Khalkhal E., Rezaei-Tavirani M., Zali M.R et al. *J. laser Med. Sci.* 2019, **10**, S104–S111.
2. Filatova S.A., Shcherbakov I.A., Tsvetkov V.B J. *Biomed. Opt.* 2017, **22**(3), 035009.
3. Копыева М.С., Filatov S.A., Kamynin V.A. et al. *Photonics* 2021, **9**(1), 20.

Химически-активированная лазерная десорбция/ионизация с переносом электрона

Лаптинская П.К.¹, Кузьмин И.И.²

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

*2- Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского
Российской академии наук, Москва*

E-mail: polinalaptinskaya@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-128-130

Метод лазерной десорбции/ионизации активируемой поверхностью (метод SALDI) основан на использовании неорганических материалов в виде наночастиц или подложек со специально приготовленным поверхностным слоем в качестве средства для ионизации химических соединений (общий принцип действия метода продемонстрирован на рис. 1).

Целью работы является разработка нового варианта метода SALDI, в котором определяемые соединения химически взаимодействуют с материалом подложки с образованием на поверхности новых соединений, имеющих высокую эффективность лазерной десорбции/ионизации с переносом электрона.

Физико-химические свойства материала подложки являются одним из ключевых факторов, определяющих эффективность образования ионов в методе SALDI. В ходе развития метода требования к подложкам менялись, а их функция усложнялась. На ранних этапах развития метода подложки выполняли главным образом транспортную функцию, обеспечивая транспортировку анализируемой пробы в ионный источник. Затем все более важную роль приобрела способность материала быстро преобразовывать энергию лазерного излучения в тепловую энергию десорбированных частиц. Исследования в этой области привели к идее применения наночастиц с характерным размером в несколько десятков нанометров [1].

Дальнейшее развитие метода позволило ввести в практику SALDI новые материалы, которые обеспечивали не только быструю десорбцию, но и эффективную ионизацию нанесенных на их

поверхность молекул органических соединений. Первый вариант ионизации основан на лазерно-индуцированном переносе протонов от поверхностных протонодонорных групп к молекулам соединений и используется для детектирования химических соединений с высокой величиной энергии сродства к протону. Наиболее популярным среди таких материалов для SALDI является нанокристаллический кремний [2]. Другой вариант ионизации основан на лазерно-индуцированном переносе электрона с молекулы в подложку (или наоборот) и используется, в частности, для детектирования комплексных соединений металлов [3]. В качестве материалов подложки высокую эффективность показали оксид переходных металлов, в частности, оксиды молибдена, вольфрама и ванадия.

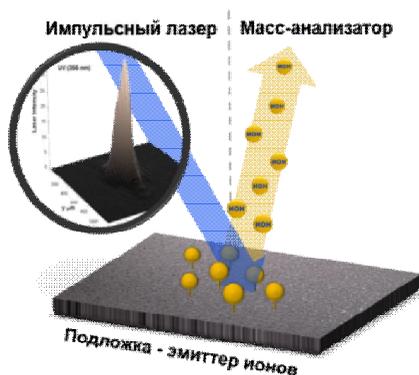


Рис. 1. Общий принцип методов лазерной десорбции/ионизации, активируемой поверхностью

В докладе представлены первые результаты исследования нового варианта метода SALDI – химически-активированной лазерной десорбции/ионизации с переносом электрона. В рамках этого варианта подложка выполняет дополнительную функцию – химически взаимодействует с нанесенными на ее поверхность определяемыми соединениями, переводя их в форму, которая легко ионизируется в условиях SALDI.

В качестве материала поверхности подложки изучен оксид молибдена, полученный путем термического окисления молибдена в воздухе. Показано, что ряд органических соединений при нанесении на поверхность способен вступать в реакцию комплексообразования

с материалом эмиттера. При последующем воздействии лазерного излучения на подложку регистрируется молекулярный ион продукта реакции. Для примера ниже представлен характерный масс-спектр, полученный после взаимодействия соединения хиналиназо-ДАФ, вступившего в реакцию с материалом подложки (рис. 2)

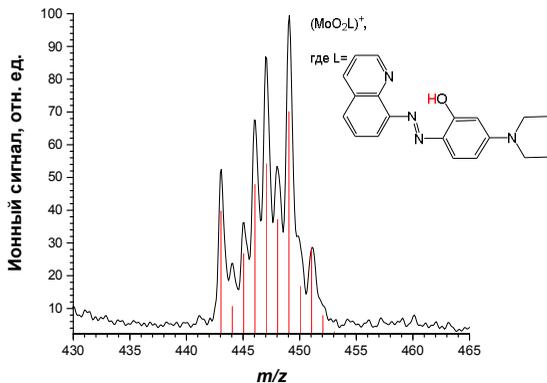


Рис. 2. Характерный масс-спектр хиналиназо-ДАФ (L), после химического взаимодействия с поверхностью подложки из оксида молибдена. Зарегистрированные пики соответствуют комплексу состава $(\text{MoO}_2\text{L})^+$

Исследовано влияние температуры подложки и условий нанесения пробы на величину ионного сигнала. Показано, что химически-активированная лазерная десорбция/ионизация позволит увеличить чувствительность определения ряда соединений на несколько порядков величины по сравнению с традиционными вариантами SALDI.

1. Tanaka K., Ido Y., Akita S., et al. Rapid Commun. Mass Spectrom. 1988, **2**(8), 151–153.
2. Alimpiev S.S., Grechnikov A.A., Sunner J., et al. Journal of Chemical Physics. 2008, **128**(1), 014711(19).
3. Алимпиев С.С., Гречников А.А., Никифоров С.М. УФН. 2015, **185**(2). 207–212.

Анализ структуры сополимеров метил(этилен)фосфата методом спектроскопии комбинационного рассеяния света

**Любимовский С.О.¹, Шляхтин А.В.²,
Годяева М.М.^{2,3}, Новиков В.С.¹**

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

*2- Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Москва*

3- Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

E-mail: liubimovskii@kapella.gpi.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-131-133

Биоразлагаемые и биосовместимые полимеры применяются для производства экологически безопасных бытовых товаров, а также имеют огромный потенциал для создания инновационной биомедицинской продукции: систем адресной доставки лекарств пролонгированного действия, имплантатов и матриц для тканевой инженерии [1]. Примерами таких перспективных материалов являются амфифильные блок-сополимеры метил(этилен)фосфата (MeOEP) с капролактоном (CL) или L-лактидом (LA). Свойствами этих сополимеров можно управлять в широком диапазоне за счёт изменения условий синтеза и постобработки, а наличие гидрофильной (PMeOEP) и гидрофобной (PCL или PLA) частей приводит к возможности самоорганизации данных сополимеров в наноструктуры различной архитектуры.

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света — метод, хорошо зарекомендовавший себя в исследованиях молекулярной и надмолекулярной структуры полимерных материалов. Однако этот метод ранее не применялся для изучения сополимеров PCL—b—PMeOEP и PMeOEP—b—PLA. Анализ возможностей спектроскопии КР при исследовании структуры таких сополимеров является целью настоящей работы.

Спектры КР сополимеров PCL—b—PMeOEP и PMeOEP—b—PLA были получены при длинах волн возбуждающего излучения 532 и 785 нм со спектральным разрешением 4 см^{-1} . В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены спектры КР исследуемых сополимеров

для длины волны 532 нм в диапазоне частот, включающем «область отпечатков пальцев» колебательного спектра вещества.

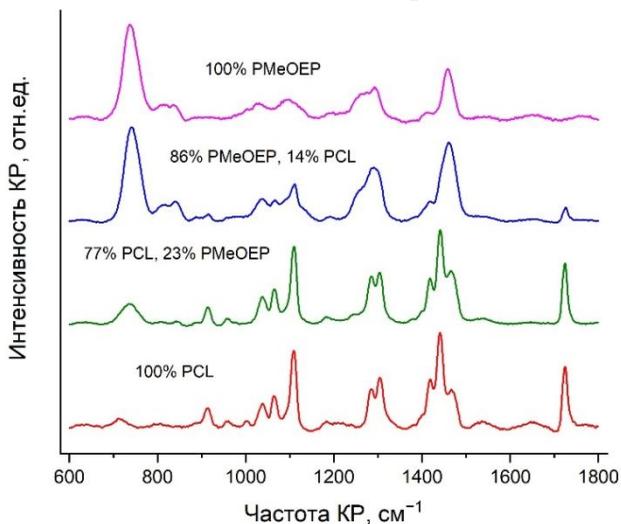


Рис. 1. Спектры КР PMeOEP, PCL и блок-сополимеров PCL—b—PMeOEP, длина волны возбуждающего излучения 532 нм.

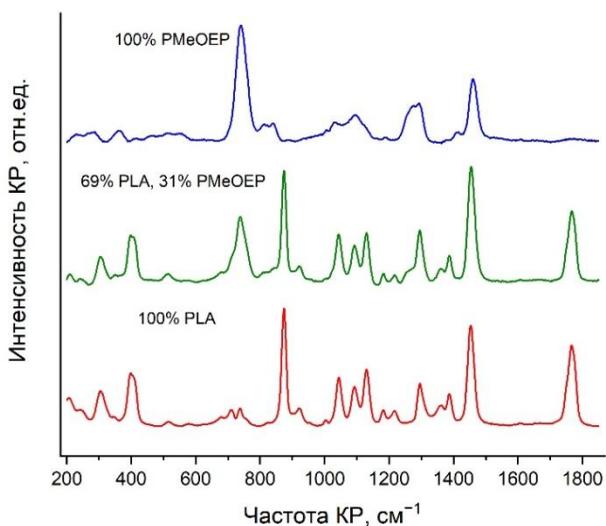


Рис. 2. Спектры КР PMeOEP, PLA и блок-сополимера PMeOEP—b—PLA, длина волны возбуждающего излучения 532 нм.

При изменении химического состава сополимеров наблюдаются монотонные изменения в их спектрах КР (рис. 1 и 2). Линии КР РМеоЕР, PCL и PLA проявляются в спектрах сополимеров на тех же частотах и имеют те же относительные интенсивности, что и в спектрах гомополимеров. Отношения интенсивностей линий, соответствующих разным гомополимерам, могут быть использованы для оценки состава сополимеров. В качестве примера на рис. 3 приведена зависимость отношения интенсивностей линий РМеоЕР и PCL в спектрах при длинах волн возбуждающего излучения 532 и 785 нм от отношения мольных содержаний МеоЕР и CL в блок-сополимере PCL—b—РМеоЕР.

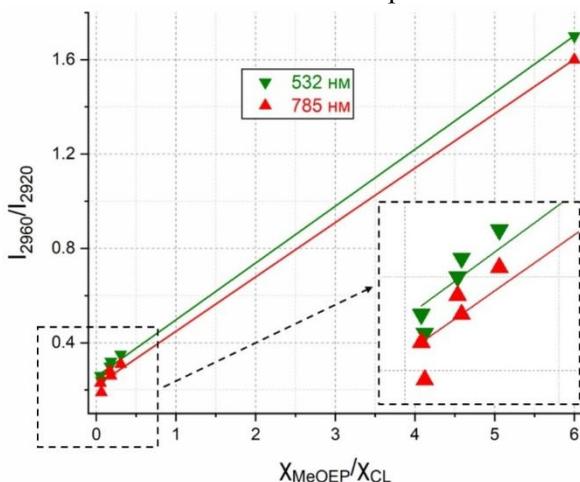


Рис. 3. Зависимость отношения интенсивностей линий 2960 (РМеоЕР) и 2920 см^{-1} (PCL) от отношения мольных содержаний МеоЕР и CL.

Таким образом, в работе показано, что спектры КР сополимеров PCL—b—РМеоЕР и РМеоЕР—b—PLA могут использоваться для оценки состава этих сополимеров.

1. Nifant'ev I.E., Shlyakhtin A.V., Bagrov V.V. et al. Dalton Trans. 2017, **46**, 12132–12146.

Оптические биосенсорные системы для высококчувствительного определения концентрации низкомолекулярных микотоксинов

Малкеров Ю.А.^{1,2}, Гутенева Н.В.¹, Орлов А.В.¹

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

*2- Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва*

E-mail: jurimalkerov@yandex.ru

DOI: 10.24412/ci-35673-2022-1-134-135

Разработаны оптические биосенсорные системы для детекции низкомолекулярных биологически активных веществ в сельскохозяйственных продуктах (микотоксинов: охратоксина А, афлатоксина В1, зеараленона). В частности, разработан новый метод детекции охратоксина А (ОТА) методом спектрально-фазовой интерферометрии с использованием стеклянной поверхности, модифицированной функционализированным аптамерами графеном. Данный метод безметочного обнаружения малых молекул основан на прямом наблюдении за изменением интерферометрического сигнала, определяемого с использованием стеклянной поверхности, модифицированной графеном. Интерферометрические сенсорные чипы при этом изготавливались с помощью переноса графена, полученного методом газофазного осаждения, на покровные стекла, что позволяет в перспективе снизить стоимость и масштабировать процедуру изготовления сенсоров.

Установлено, что прямая детекция с помощью ОТА-специфических аптамеров характеризуется быстрым и значительным изменением оптического сигнала при регистрации максимально допустимого уровня концентрации ОТА. Показана возможность регенерации сенсора с помощью раствора мочевины.

Применяемый в разработанном прототипе метод основан на интерференции световых волн, возникающей после отражения от опорной стороны сенсорного чипа и от границы раздела биослой-вода, и на определении фазы распределения интенсивности в детектируемой интерференционной картине. Поскольку показатель

отражения для графена ($n = 2.9$ при 850 нм) относительно высок по сравнению с показателями воздуха (1), стекла (1,5) и воды (1,33), его влиянием на фазовый сдвиг нельзя пренебречь. Был получен спектр отражения структуры стекло/графен/аптамер, измеренный ПЗС-матрицей прототипа сенсора, при освещении источником ИК-света с центральной длиной волны 850 нм и спектральной шириной 30 нм (на половине высоты).

Разработанная платформа может использоваться для высокочувствительного определения и прямого кинетического анализа как микотоксинов, так и других низкомолекулярных соединений, с применением доступных оптических сенсорных чипов с сенсорным слоем «графен-аптамер» [1–2].

При этом микотоксины являются одними из основных природных контаминантов продуктов питания. Их предельно допустимая концентрация составляет 1–50 мкг/кг в зависимости от вещества, типа продукта питания и регламентирующих документов. Разработанные аналитические системы обладают характеристиками, значительно превосходящими требования к инструментам в области детекции микотоксинов.

Автор выражает благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Никитину П.И., и коллективу лаборатории «Биофотоника» ЦЕНИ ИОФ РАН, в частности Знойко С.Л.

1. Nekrasov N. et al. Biosensors and Bioelectronics. 2022, **200**, 113890
2. Orlov A.V. et al. Food Chemistry. 2022, **383**, 132427.

Макалувамин G — рамановская метка для регистрации никотинового рецептора

Можаева В.А.^{1,2}, Кудрявцев Д.С.², Прохоров К.А.¹

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

*2- Институт биоорганической химии им. М.М. Шемакина и
Ю.А. Овчинникова РАН, Москва*

E-mail: Veramozhaev@yandex.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-136-138

Известно, что некоторые биологически активные молекулы, выделенные из различных животных, в частности морских организмов, являются естественными лигандами никотинового ацетилхолинового рецептора (НАХР) и обладают высоким сродством и селективностью к данному рецептору. Поэтому для оптической регистрации НАХР часто используют меченые оптической меткой подобные природные лиганды. Но «пришивание» метки, как правило, отрицательно сказывается на свойствах лиганда. Сочетание же в одной молекуле свойств лиганда и оптической метки даёт существенное преимущество. При этом, такая молекула со свойствами рамановской метки может обеспечить регистрацию факта связывания с рецептором, так как рамановские спектры лиганда чувствительны, в частности, к изменению его окружения.

Макалувамин G (Мак) – это соединение (Рис. 1), выделенное из морских губок, и оно может быть крайне полезно для биоимиджинга [1]. Кроме того, ранее было показано [2], что Мак селективно связывается с НАХР.

Этот факт, наряду с интересными оптическими свойствами, делает Мак многообещающим соединением, которое может объединять в себе свойства оптической метки и агента, специфически нацеленного на НАХР. Нами был записан рамановский спектр водного раствора Мак, при сравнении которого с рядом спектров других органических лигандов НАХР, полученных при тех же условиях, интенсивность рамановского сигнала для Мак была значительно (примерно в 20 раз) выше таковой для других лигандов. Рамановские спектры были записаны на микроскопе-

спектрометре при возбуждении с длиной волны 532 нм. Чтобы исследовать оптические свойства Мак, мы также сняли спектры его поглощения и флуоресценции. Было обнаружено, что данная молекула поглощает излучение в широком интервале УФ и видимого диапазона, но при этом флуоресцирует только в относительно узком регионе вблизи 300 нм. Все это является крайне привлекательным для рамановской спектроскопии этого соединения.

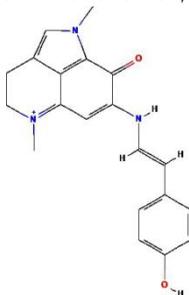


Рис. 1. Структурная формула макалувамина G.

Так как Мак является лигандом НАХР, мы решили проверить, сможем ли мы зафиксировать какие-либо изменения в спектре Мак при его взаимодействии с рецептором. В качестве модели НАХР мы использовали ацетилхолин связывающий белок (АХСБ). Мы получили спектры смесей АХСБ с Мак с различным молярным отношением данных лиганда и рецептора (Мак/АХСБ=0.6, 1, 4, 8, 10). Мы заметили, что пик в районе 678 см^{-1} демонстрирует динамику увеличения интенсивности при росте молярного отношения Мак/АХСБ. Поэтому далее мы сосредоточили внимание на этом пике, проведя при этом нормировку на соседний «реперный» пик с частотой 706.5 см^{-1} (Рис. 2(а)). Чтобы более наглядно представить динамику интенсивности пика 678 см^{-1} , мы рассчитали отношения интенсивности рамановского сигнала на этой частоте к интенсивности на частоте 706.5 см^{-1} ($I_{687}/I_{706.5}$) для всех спектров. Зависимость этого отношения интенсивностей $I_{687}/I_{706.5}$ от молярного отношения Мак/АХСБ приведена на Рис. 2(б).

Исходя из полученных данных можно утверждать, что был обнаружен диапазон спектра, чувствительный к связыванию Мак с АХСБ.

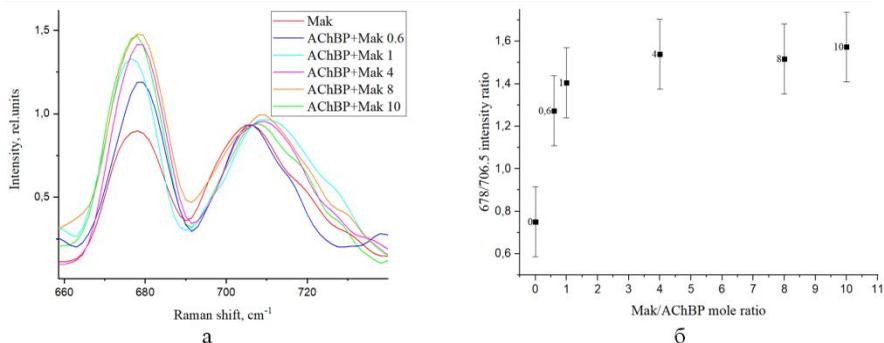


Рис. 2. Диапазон 660–740 см⁻¹ спектров рамановского рассеяния образцов с различным молярным отношением лиганда Мак и рецептора АХСБ (а) и величина соотношения интенсивностей характерных пиков I₆₈₇/I_{706.5} для этих спектров (б).

Таким образом, в данной работе мы впервые показали, что Мак является потенциальным соединением для обеспечения безмаркерной регистрации взаимодействия с НАХР.

1. Milne B.F., Norman P. J. Phys. Chem. A. 2015, **119**, 5368–5376.
2. Kudryavtsev D.S., Spirova E.N., Shelukhina I.V. et al. Mar. Drugs. 2018, **16**.

Исследование спектров комбинационного рассеяния растворов бета-каротина и ликопина

**Новиков В.С.¹, Лаптинская П.К.¹,
Большаков М.А.², Годяева М.М.^{3,4}**

1- *Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

2- *Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино,
Московская область*

3- *Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва*

4- *Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Москва.*

E-mail: vs.novikov@kapella.gpi.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-139-141

Каротиноиды — физиологически активные соединения, часть из которых проявляют антиоксидантные и провитаминные свойства в организме человека. Кроме того, каротиноиды играют важную роль в процессе фотосинтеза растений. Физико-химические и биологические свойства каротиноидов (например, биодоступность) зависят не только от структуры самой молекулы, но и от её конфигурации (пространственной изомерии).

Известно около 700 каротиноидов, однако наибольший интерес для исследований представляют *бета*-каротин и ликопин, которые наиболее важны для жизнедеятельности человека и повсеместно используются в медицинской практике как нутрицевтики. Каротиноиды, которые поступают в организм человека и животных только с пищей, накапливаются в различных типах тканей, а их локализация, количество и качественный состав в определенном типе ткани могут служить прямым или косвенным признаком протекания патологического процесса.

В различных областях деятельности человека все чаще и чаще становится востребованным достоверное качественное и количественное определение содержания, химического и изомерного состава каротиноидов в биотканях, продуктах питания и биодобавках, лекарственных и других биологически активных средствах, причем зачастую при этом требуются диагностические

методы, обеспечивающие экспрессный и неинвазивный анализ. Например, при использовании спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) возможно проведение *in vivo* диагностики каротиноидов в таких объектах, как кожный покров человека и животных, вегетативные органы (лист, стебель) растений. Все перечисленные объекты имеют сложное строение и химический состав: в таких объектах молекулы каротиноидов находятся в окружении других веществ, которые могут влиять на различные свойства молекул каротиноидов и, как следствие, на их колебательные спектры.

Наиболее информативными линиями КР каротиноидов являются полосы валентных колебаний C–C и C=C связей (рис. 1 и 2), спектральные характеристики которых зависят от длины сопряжения, структуры боковых и концевых групп [1]. Однако характеристики этих полос заметно отличаются в спектрах чистых каротиноидов и каротиноидов в биотканях и растворах. Поэтому для достоверной диагностики каротиноидов методом спектроскопии КР актуальным является определение влияния окружения на спектр КР каротиноидов.

Целью данной работы было исследование изменений в спектрах КР *бета*-каротина и ликопина в растворах: хлороформа, этилацетата и тетрагидрофурана – а также *бета*-каротина в светособирающем комплексе 2 (MES, NaCl, хлорофилл и *бета*-каротин).

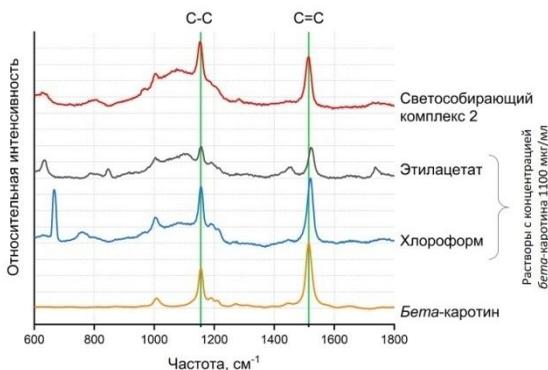


Рис. 1. Спектры КР светособирающего комплекса 2, растворов с концентрацией *бета*-каротина 1100 мкг/мл и чистого *бета*-каротина.

Спектры КР регистрировались при длине волны

возбуждающего излучения 532 нм. В качестве примеров, на рис. 1 и 2 представлены спектры КР *бета*-каротина и ликопина соответственно, а также растворов *бета*-каротина с концентрацией 1100 мкг/мл в различных растворителях (рис. 1) и растворов с различными концентрациями ликопина (2, 20, 200 мкг/мл) в тетрагидрофуране (рис. 2).

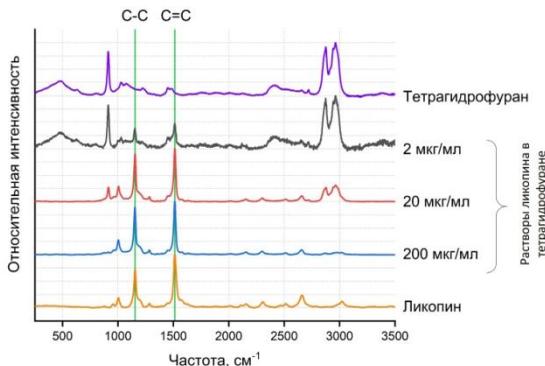


Рис. 2. Спектры КР чистого ликопина, растворов ликопина с различной концентрацией в тетрагидрофуране и тетрагидрофурана.

В спектрах КР растворов *бета*-каротина линия, отвечающая валентным колебаниям C=C связей, смещается на 5–8 см⁻¹ относительно положения в спектрах чистого каротиноида (рис. 1). В случае ликопина смещения положений линий не происходит в пределах используемого спектрального разрешения. Обнаружено, что отношения пиковых интенсивностей полосы валентных колебаний C=C связей в каротиноидах и линий КР растворителей могут быть использованы для оценки концентрации каротиноида в растворе.

1. Novikov V.S., Kuzmin V.V., Darvin M.E. et al. Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc. 2022, **270**, 120755.

Определение специфичности и чувствительности метода определения фолиевой кислоты с помощью безметочного биосенсора на основе спектрально-корреляционной интерферометрии

**Новичихин Д.О.^{1,2}, Гутенева Н.В.¹,
Скирда А.М.^{1,2}, Брагина В.А.¹**

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

*2- «Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва*

E-mail: nammen@yandex.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-142-144

Одной из задач современной биосенсорики является детекция низкомолекулярных веществ – гаптенов [1, 2]. В данной работе были продемонстрированы селективность и параметры чувствительности безмаркерного биосенсора для определения гаптенов на примере детектирования фолиевой кислоты — витамина В9, играющего важную роль в развитии и функционировании живых организмов. Выбор данного аналита обусловлен недостатками существующих методов его детекции и целесообразностью сравнения результатов, полученных безметочным методом спектрально корреляционной интерферометрии (СКИ) [3–6] для решения подобных задач. В основе СКИ метода лежит использование одной из поверхностей тонкой плоскопараллельной стеклянной пластины в качестве опорной. Относительно неё с высокой чувствительностью и метрологической точностью в реальном времени регистрируется изменение оптической толщины биомолекулярного слоя на противоположной поверхности с помощью низкокогерентной интерферометрии.

Фолиевая кислота является важным компонентом для продуцирования здоровых клеток организма, репликации ДНК и образования нервного столба у плода на ранней стадии беременности. Оптимальной концентрацией фолиевой кислоты в крови человека является 2.7-17.0 нг/мл, а при её недостатке может проявиться мегалобластная анемия, снижение скорости роста

развивающегося организма, сердечно-сосудистые и онкологические заболевания, болезнь Альцгеймера и проблемы с усвоением витаминов и минералов. Концентрации в сыворотке крови человека менее 2.7 нг/мл (6.8 нмоль/л) обычно указывают на недостаточность фолиевой кислоты.

Материалы и методы

Модификация поверхности стекла

Очистка поверхности стекла осуществлялась с помощью смеси перекиси водорода и серной кислоты в соотношении 1:3. Включение свободных аминогрупп на поверхность стекла было реализовано с помощью инкубации раствора 3 % (3-Аминопропил)триэтоксисилана в метаноле в течение ночи. Затем осуществлялась промывка метанолом и высушивание, после чего наносился карбоксильный слой. Для этого стекла выдерживались в растворе янтарного ангидрида в диметилформамиде в течение 2 часов, далее стекло высушивалось и хранилось при комнатной температуре.

Изготовление конъюгата фолиевой кислоты и желатина

Раствор 7 мг фолиевой кислоты в 300 мкл диметилсульфоксида смешивали с 2.7 мг EDC и 50 мг N-Гидроксисукцинимид, растворенным в 200 мкл 0.1 М буфера 2-(N-морфолино)этансульфоновой кислоты. Данная смесь выдерживалась 20 мин при комнатной температуре, после этого добавили 200 мкл 0.5 М боратного буфера с последующим добавлением 400 мкл 1 % водного раствора желатина. Смесь выдерживали ночь при температуре +4 °С, далее продукт осаждали с помощью 8 мл ацетона. Осадок отделяли центрифугированием.

Результаты и обсуждение

Разработанный метод состоит из двух этапов. Сначала анализируемый раствор смешивали с антителами к фолиевой кислоте и инкубировали в течение 5 мин. После этого раствор пропускали по поверхности стекла в течение 15 мин. Для повышения точности и снижения шума в тот же стеклянный сенсорный чип введен дополнительный референсный канал, через который прокачивался буфер без целевых аналитов. Предлагаемый анализ имеет короткое время (20 мин) и позволяет отслеживать все этапы анализа в режиме реального времени. Разработанный метод демонстрирует предел обнаружения 0.9 нг/мл и динамический диапазон 3 порядка, что охватывает клинически значимые концентрации фолиевой кислоты в

плазме крови человека. Кроме того, в методе используются конкурентоспособные по стоимости и экономичные сенсорные чипы. Такие одноразовые расходные материалы привлекательны для использования, например, в области рутинной медицинской диагностики *in vitro*.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Никитину П.И. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Wright J.D. et al., Sensors and Actuators B Chem. 1998, **51**(1), 305–310.
2. Orlov A.V. et al. Data in brief. 2018, **21**, 1603–1611.
3. Orlov A.V. et al. International Journal of Molecular Sciences. 2022, **23**(9), 4474.
4. Burenin A.G. et al. Applied biochemistry and microbiology. 2013, **49**(3), 306–311.
5. Orlov A.V. et al. Biosensors and Bioelectronics. 2020, **159**, 112187.
6. Orlov A.V. et al. Acta Naturae, 2014, **6**(20), 85–95.

Комбинационное рассеяние в диагностике биоптатов внутричерепных опухолей

Оспанов А.Р.¹, Романишкин И.Д.²

*1- Национальный исследовательский ядерный университет
«Московский инженерно-физический институт», Москва*

*2- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

E-mail: ospanovanuar99@gmail.com

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-145-146

На настоящий момент существует ряд проблем в нейроонкологии, подходы к которым могут осуществляться посредством использования оптико-спектральных методов. Одной из таких проблем является сложность определения границ опухолей ввиду особенности их роста. Глиальные опухоли прорастают в белое вещество головного мозга вдоль кровеносных сосудов и нервных волокон. Это усложняет радикальное удаление опухоли и приводит к высокой частоте рецидивов. Используемые в настоящее время методы оптической демаркации в основном являются качественными, а не количественными, и анализируют только один тип опухолевых маркеров. Видеофлуоресцентная навигация с красителем протопорфирин IX позволяет получить высокий контраст между глиомой высокого грейда и здоровой тканью, но не позволяет определить злокачественную ткань для глиом низкого грейда [1].

Спектроскопия комбинационного рассеяния позволяет неинвазивно анализировать химический состав биологической ткани с целью определения степени ее злокачественности. Отсутствие необходимости использования дополнительных красителей является одним из преимуществ данного метода.

Целью данной работы было исследование различий в спектрах комбинационного рассеяния опухолей головного мозга для определения отличий в химических составах тканей.

Исследования проводились в НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н.Н. Бурденко на образцах опухолевых тканей, извлеченных во время нейрохирургических операций непосредственно после удаления.

Спектры спонтанного комбинационного рассеяния (КР) получали с помощью установки, состоящей из спектрометра Raman-HR-TEC-785 (StellarNet, США), источника лазерного излучения Ramulaser-785 (StellarNet, США; длина волны излучения 785 нм), волоконно-оптического конфокального зонда для доставки лазерного излучения и сигнала КР.

Спектры КР каждого образца регистрировали в серии из 10 измерений с экспозицией в 30 секунд. Перед каждой серией измеряли фоновый сигнал (серия из 20 измерений по 30 секунд каждый). Измерение производилось в затемненном помещении.

Была проведена первичная обработка спектров КР. Спектры усреднялись, производилось их сглаживание фильтром Савицкого-Галея (ширина подвижного окна 15 пикселей, полином 3-й степени), фоновый и флуоресцентный сигналы вычитались с помощью алгоритма airPLS [2]. На рис. 1 представлены спектры КР биоптатов пациентов с диагнозами глиобластома (WHO Grade 4) и метастаз молочной железы (WHO Grade 1).

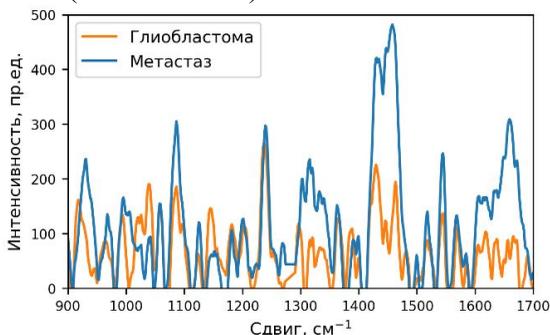


Рис. 1. Спектры КР 2 биоптатов пациентов с диагнозом глиобластома и метастаз молочной железы.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Лощену В.Б. и к.ф.-м.н. Савельевой Т.А. за постановку научной задачи и обсуждение результатов.

1. Potapov A.A., Goriaïnov S.A., Loshchenov V.B., et al. Zhurnal voprosy neirokhirurgii imeni N. N. Burdenko. № 2 (77). 3–10.
2. Zhang Z.-M., Chen S., Liang Y.-Z. The Analyst. 2010, **135**(5), 1138.

**Метод высокочувствительной детекции внеклеточных
везикул на основе магнитных наномаркеров,
разработанный с помощью визуализирующей проточной
цитометрии**

**Скирда А.М.^{1,2}, Орлов А.В.¹,
Новичихин Д.О.^{1,2}, Брагина В.А.¹**

*1- Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук», Москва*

*2- Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва.*

E-mail: artemskirda@mail.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-147-149

В основе диагностики широкого спектра социально-значимых заболеваний лежат неинвазивные и малоинвазивные методы, позволяющие судить о состоянии пациента по наличию или отсутствию определенных маркеров в анализируемых биологических образцах. В настоящее время одной из наиболее интенсивно развивающихся областей является «жидкая биопсия» — новый подход, основанный на определении концентраций молекулярных биомаркеров в различных биологических жидкостях (плазме, сыворотке крови, моче и т.д.). Особый интерес представляют мембранные рецепторные белки, присутствующие на поверхности внеклеточных везикул. Обнаружение данных белковых маркеров выше определенных пороговых значений может свидетельствовать о развитии онкологических заболеваний [1], возрастных изменениях организма [2] или структурных изменениях в сердечно-сосудистой системе [3].

В данной работе был разработан комплекс подходов на основе оптических и магнитных методов, позволяющих проводить высокочувствительную детекцию внеклеточных везикул с применением магнитных наночастиц (МЧ) в качестве меток, а также осуществлять визуализацию иммунокомплексов «везикулы— биоконъюгаты МЧ» с помощью метода визуализирующей проточной цитометрии.

В качестве антигенов для детекции везикул использовались их

поверхностные мембранные белки: CD81, CD9 и EpCAM. Подбор оптимальных антител для детекции данных белковых маркеров осуществлялся с применением метода спектрально-корреляционной интерферометрии [4] по регистрации кинетики специфических взаимодействий антиген-антитело. Визуализация иммунокомплексов «везикулы—биоконъюгаты МЧ» проводилась с помощью цитофлуориметра Amnis ImageStream X Mark II при 40-кратном увеличении. Белковые маркеры везикул взаимодействовали с биоконъюгатами «антитело-МЧ», меченными флуоресцентными метками, возбуждающимися излучением с длинами волн 488 и 642 нм. Для измерения бокового светорассеяния использовался лазер с длиной волны 785 нм и мощностью 70 мВт.

С помощью метода визуализирующей проточной цитометрии было установлено, что подбор антител на основе измерения кинетических констант взаимодействия пар антиген-антитело, полученных с помощью метода спектрально-корреляционной интерферометрии, был осуществлен оптимальным образом. На рис. 1 представлены изображения флуоресцентно меченных биоконъюгатов «антитело-МЧ», специфично связавшихся с мембранными белковыми маркерами везикул. На основе полученных данных была разработана иммуноаналитическая система, превосходящая по чувствительности коммерчески доступные тест-системы для детекции внеклеточных везикул, с пределом детекции 3.7×10^5 везикул в мкл и динамическим диапазоном более двух порядков [5].

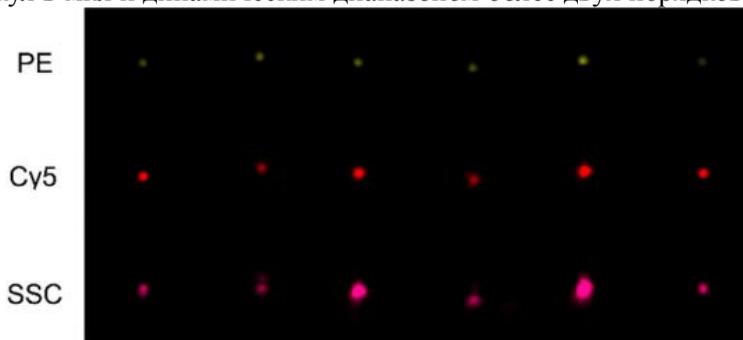


Рис. 1. Изображения иммунных комплексов, образованных Cy5-анти-CD9-МЧ с внеклеточными везикулами, окрашенными PE-анти-CD81 антителами в Cy5, PE каналах и канале бокового светорассеяния (SSC).

Авторы выражают благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Никитину П.И. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов, а также коллеге Мочаловой Е.Н. за предоставление доступа к визуализирующему проточному цитометру Amnis ImageStream X Mark II.

1. Yoshioka Y. et al. Journal of extracellular vesicles. 2013, **2**(1), 20424.
2. Robbins P.D. et al. Stem cell investigation. 2017, **4**.
3. Chistiakov D.A. et al. International journal of molecular sciences. 2016, **17**(1), 63.
4. Nikitin P.I. et al. Sensors and Actuators B: Chemical. 2005, **111**, 500–504.
5. Bragina V.A. et al. Nanomaterials. 2022, **12**(9), 1579.

Исследования электронных свойств молекул ксенобиотиков методом спектроскопии диссоциативного захвата электронов

Таюпов М.М., Поглазов К.Ю., Юсупова Р.М.

Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа.

E-mail: tayupovmansaf@yandex.ru

DOI: 10.24412/ci-35673-2022-1-150-151

Сложный многостадийный процесс детоксификации ксенобиотиков, в том числе лекарств, начинается с так называемой первой фазы метаболизма, а именно, с расщепления молекулы ксенобиотика в гепатоцитах под действием мембранных ферментов системы цитохрома P450 [1, 2]. Интермедиаты, образованные после вхождения второго электрона в цикл P450, являются чрезвычайно активными, поэтому экспериментальное наблюдение этих процессов сопряжено со значительными трудностями [3]. В связи с этим разумно предположить, что второй электрон может взаимодействовать в активном центре не с молекулой O₂, а с молекулой субстрата (слабо связанной водородными связями [3]), особенно, если сродство к электрону последней будет выше, чем у молекулярного кислорода, что должно привести к конкуренции за захват второго электрона. В таком случае, активные радикалы могут быть образованы благодаря «метаболической активации» [4] субстрата вторым электроном по механизму диссоциативного захвата электронов.

Ранее, с помощью метода масс-спектрометрии резонансного захвата электронов отрицательных ионов нами было показано, что метаболиты различных медицинских препаратов и пищевых консервантов схожи с продуктами распада этих молекул при взаимодействии с электронами низких энергий [5, 6].

В данной работе в продолжение этих исследований были рассмотрены молекулы таких веществ как бензофуран-3(2H)-он, бензофуран-2(3H)-он и 5,6-метилendioкси-1-инданон. Как показал эксперимент, в диапазоне энергий существующих во внутриклеточной среде электронов (0–4 эВ) при диссоциативном захвате электронов этими веществами образуется достаточно

большое количество фрагментов. Был сделан вывод о том, что данные фрагменты не являются токсичными либо потенциально токсичными.

Исследование проведено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-13-00021-П).

1. Denisov I.G., Makris T.M., Sligar S.G., Schlichting I. *Chemical Reviews*. 2005, **105**(6), 2253–2278.
2. Rittle J., Green M.T. *Science*. 2010, **330**(6006), 933–937.
3. Meunier B., De Visser S.P., Shaik S. *Chemical Reviews*. 2004, **104**(9), 3947–3980.
4. Slater T.F. *Biochemical Journal*. 1984, **222**(1), 1–15.
5. Pshenichnyuk S.A., Modelli A., *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2013, **15**(23), 9125–9135.
6. Таюпов М.М. и др., *Математическая физика и компьютерное моделирование*. 2021, **24**(2), 54–67.



ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ: НОВЫЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Разработка системы для вычисления расстояния до объекта на основе построения карты глубин

Рублева Е.А., Мудрич А.Б.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

E-mail: elena@erubleva.ru

DOI: 10.24412/cl-35673-2022-1-152-153

Системы компьютерного зрения получили широкое распространение в робототехнике. Они используются для решения различных задач: навигация в пространстве, определение объектов для манипулирования, распознавание препятствий на пути движения, определение уровня освещения. Популярность использования технологий компьютерного зрения связана с постоянным ростом вычислительных мощностей, необходимых для обработки больших объёмов данных, и доступностью видеочамер.

Цель исследования – разработать систему для вычисления расстояния до объекта с использованием стереочамеры и возможностью динамической смены объекта. Для выполнения исследования используются экспериментальные методы.

В работе решена практическая задача определения расстояния от рабочего инструмента робота-манипулятора до объекта манипулирования. Применяется функциональная схема аппаратной части робототехнического комплекса с сервером данных и системой технического зрения [1]. Для решения задачи использовались две камеры с одинаковыми фокальными расстояниями, размещенные рядом с местом крепления рабочего инструмента. Вторая камера необходима для построения карты глубины и восстановления информации о расстоянии до объекта.

Программное обеспечение для робота написано с использованием системы Robot Operating System, для управления манипулятором используется пользовательский веб-интерфейс, а для реализации технического зрения – возможности библиотеки OpenCV [2].

Чтобы по камере можно было определить интересующий объект, перед сеансом работы с системой его необходимо

«запомнить». Оператор должен поднести предмет к камере и следовать инструкциям.

Система способна с точностью до 1 мм рассчитать расстояние до запомненного предмета, если он находится в зоне видимости камеры. Эти данные ложатся в основу решения задачи обратной кинематики робота-манипулятора и вычисления траектории перемещения рабочего инструмента в пространстве.

1. Борисов О.И., Громов В.С. и Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями, Санкт-Петербург, 2016.
2. Ильясов Э.С. Вычисление расстояния до наблюдаемого объекта по изображениям со стереопары. Молодой ученый. 2016, № 14, 146–151.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Азаревич А.Н.	29	Зайцев К.И.	119
Айбыжы К.О.	46	Зверев А.Д.	11
Александров А.А.	95	Каменова С.В.	75
Александрова П.В.	119	Камынин В.А.	11, 26, 125
Алексеева А.И.	119	Кашайкин П.Ф.	20
Алешкина С.С.	17	Кирий Н.П.	116
Андрюшин К.П.	49	Комлёнок М.С.	14
Астафьев П.А.	49	Копьева М.С.	125
Блинов А.В.	85, 88	Красиков К.М.	32
Блинова А.А.	69, 85	Красников Д.В.	26
Бобков К.К.	17	Кудрявцев Д.С.	136
Большаков М.А.	139	Кудрявцев О.С.	29
Борзосек В.Д.	105	Кузнецов С.М.	35
Брагина В.А.	142, 147	Кузьменко А.М.	41
Бражко Е.А.	85	Кузьмин И.И.	128
Вахрушев А.С.	7	Кулебякин А.В.	99
Волкова Ю.А.	62	Кулямин П.А.	66
Гаврилов С.Ю.	52	Курочицкий Н.Д.	14
Галимзянов Б.Н.	55, 73	Лапина М.Д.	23
Гаянова Т.Э.	101	Лаптинская П.К.	128, 139
Гвозденко А.А.	88	Любимовский С.О.	131
Годяева М.М.	35, 131, 139	Маглакелидзе Д.Г.	69, 85, 88
Голик А.Б.	88	Малкеров Ю.А.	134
Грициенко А.В.	77	Мартьянов А.К.	71, 77, 83, 95
Грудиев Е.И.	103	Милович Ф.О.	99
Гудкова В.В.	105, 113	Миргазизова Е.Ф.	38
Гурьев Д.А.	59	Михайлов Е.К.	17
Гутенева Н.В.	134, 142	Можаева В.А.	136
Добрецова Е.А.	59	Мокшин А.В.	55, 73
Долганова И.Н.	119	Мудрич А.Б.	152
Доронина М.А.	55	Никитин П.В.	119
Дробышева А.Р.	95	Никифоров Г.А.	73
Ермакова Ю.А.	95	Новиков В.С.	131, 139
Желнов В.А.	122	Новичихин Д.О.	142, 147
Жидель К.М.	57	Новокрещенов П.В.	125
Жмыхов В.Ю.	59	Новоселова К.Н.	75
Жуков В.И.	108	Образцова Е.А.	101
Журкин В.С.	29	Орлов А.В.	134, 147
Заворотная У.М.	62	Орлов А.П.	77

Оспанов А.Р.	145	Тагопов М.М.	150
Павленко А.В.	57	Терещенко Д.П.	23
Павлик Т.И.	113	Тимофеева Е.Э.	90
Пирогов М.А.	69	Тихановский А.Ю.	41
Поглазов К.Ю.	150	Томская А.Е.	93
Пономарев И.И.	62	Тяжелов И.А.	71, 83, 95
Поспелова Е.А.	20	Филатова С.А.	26, 125
Потапов А.А.	110	Фогель М.	62
Привалов А.Ф.	62	Франк А.Г.	116
Прохоров К.А.	136	Хабушев Э.М.	26
Пушкарь И.М.	125	Харлачев Д.Е.	116
Разволяева Д.А.	105, 113	Хоменко М.Р.	97
Романишкин И.Д.	145	Хорошилов А.Л.	32
Ромшин А.М.	77	Хуснутдинов Р.М.	44
Рублева Е.А.	152	Цветков В.С.	59
Рыбин М.Ф.	14	Числов А.С.	99
Самарин А.Ш.	80	Шайдулин А.Т.	90
Саху С.	49	Швачко А.А.	110
Седов В.С.	71, 83, 95	Шевченко И.М.	69
Скирда А.М.	142, 147	Шляхтин А.В.	131
Сляднева К.С.	85	Юнусов М.Б.	44
Смагулова С.А.	93	Юсупова Р.М.	150
Степахин В.Д.	101	Ясная М.А.	69
Тараванов М.А.	88		

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



ИОФ РАН

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики
им. А.М. Прохорова
Российской академии наук»



Министерство
науки и высшего образования
Российской Федерации

ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ «ПРОХОРОВСКИЕ НЕДЕЛИ»

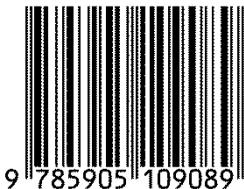
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

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

*Дизайн обложки М.Н. Маяковой
Технический редактор В.Е. Шукиин*

Свёрстано 17.08.2022
Подписано в печать 12.09.2022
Формат 60×90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 5,0.
Тираж 100 экз. Заказ № ПН-2022.
Отпечатано в ООО «МДМпринт»
г. Москва, тел. +7(495) 256-10-00

ISBN 978-5-905109-08-9



ISBN 978-5-905109-08-9



9 785905 109089