



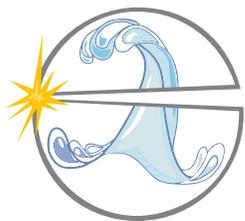
СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Л.В. КИРЕНСКОГО
Сибирского отделения Российской академии наук
ФИЦ КНЦ СО РАН

**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ**



ЕНИСЕЙСКАЯ ФОТОНИКА — 2022

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ТОМ 2

Красноярск
19–24 сентября 2022 года

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

Российская академия наук
Сибирское отделение
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр»
Институт физики им. Л. В. Киренского

ЕНИСЕЙСКАЯ ФОТОНИКА – 2022

Всероссийская научная конференция
с международным участием

тезисы докладов

Том 2

19–24 сентября 2022 г.

Красноярск
2022

УДК 535
ББК 22.34
Е 63

Енисейская Фотоника – 2022. Всероссийская научная конференция с международным участием. Тезисы докладов. 19–24 сентября 2022 года, Красноярск. Т. 2. – Изд-во ИФ СО РАН, 2022. – 164 с.

В сборнике представлены тезисы докладов второй Всероссийской научной конференции с международным участием «Енисейская Фотоника – 2022», проходившей в г. Красноярске с 19 по 24 сентября 2022 г. Сборник предназначен для научных сотрудников, аспирантов, преподавателей и студентов, интересующихся проблемами фотоники, оптики и спектроскопии. Подготовка и проведение конференции осуществлены при поддержке Красноярского краевого фонда науки (договор № 313 от 09.06.2022) и Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства образования и науки Российской Федерации. Тексты печатаются по решению Программного комитета конференции в авторской редакции.

ISBN 978-5-6045250-1-2

ISBN 978-5-6045250-1-2



© Коллектив авторов, 2022
© Сибирский федеральный университет, 2022
© Институт физики им. Л. В. Киренского, 2022

ЭМТИОН - это российская компания, специализирующаяся на производстве и поставках аналитического и технологического оборудования.

Атомно-силовая микроскопия



Поддержка всех существующих методик измерений (атомно-силовая микроскопия, магнитно-силовая микроскопия, электро-силовая микроскопия, силовая микроскопия пьезоотклика, измерения в вакууме, в жидкости, электрохимических средах и др.)

Прыжковая микроскопия для количественного наномеханического анализа

Диапазон сканирования 100x100x10 мкм

Разрешение по оси Z - 0,05 нм

Конфокальная Рамановская микроскопия



Два автоматически переключаемых лазера в видимом диапазоне длин волн

Пространственное разрешение по XY 390 нм (при использовании лазера 473 нм, 100x, NA 0.95)

Спектральный диапазон 400-1100 нм

Спектральное разрешение 0.25 см⁻¹ (решётка 75 штр/мм Эшелле и лазер 532 нм)

Регулируемый пинхол

Оптическая микроскопия



Реализация режимов работы в светлом и темном поле, эпифлуоресценции, поляризации, дифференциально-интерференционного контраста. Доступные объективы 10x, 20x, 40x, 50x, 100x, 150x

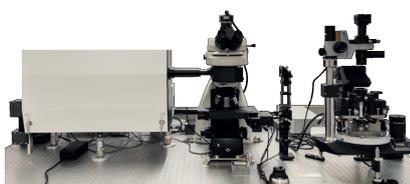
Моторизованная турель для установки до бти объективов

Размер исследуемых образцов до 300мм в диаметре

Светодиодные широкополосные осветители

Ведущие специалисты компании имеют 15-летний опыт работы в области приборостроения. ЭМТИОН может предложить Заказчикам как отдельные конкурентные решения, так и комплексное оснащение лабораторий, начиная с этапов проработки концепции и предпроектных работ и заканчивая вводом оборудования в эксплуатацию.

Комбинированные АСМ – Раман системы



Одновременные исследования образцов методами сканирующей зондовой микроскопии и конфокальной микроскопии/ спектроскопии комбинационного рассеяния (Раман)

Зондово-усиленная Рамановская/ флуоресцентная спектроскопия (TERS, EFS5, TERFS)

Одновременное использование до 5-ти лазеров, полная автоматизация

Быстрое сканирование (1000x1000 точек за 3 сек.)

Электронная микроскопия



Термоэмиссионный катод / катод типа Шоттки

Ускоряющее напряжение 0.1 - 30 кВ

Увеличение от 6 до 1 000 000X

Разрешение до 1 нм

Моторизованный по 5-ти осям предметный столик

Опции низкого вакуума и низкого ускоряющего напряжения

Система энергодисперсионного микроанализа

Широкий выбор дополнительных детекторов

Рентгеновские дифрактометры



Порошковые и монокристалльные дифрактометры

Высокопроизводительные детекторы Mythen (Швейцария)

Вращение образца на 360°

Диапазон сканирования -110°/161°

Минимальный шаг сканирования

0,0001°

Автосменщик образцов 6/8шт

Нагрев от -196°С до 1600°С

Опции для измерения тонких пленок

База данных спектров, программа обработки спектров Jade, совместимость с ПО заказчика

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

- *Шабанов Василий Филиппович* — д-р физ.-мат. наук, академик РАН, научный руководитель ФИЦ КНЦ СО РАН (г. Красноярск)

Ученый секретарь:

- *Ципотан Алексей Сергеевич* — канд. физ.-мат. наук, доцент баз. кафедры фотоники и лазерных технологий, ИИФиРЭ СФУ (г. Красноярск)

Состав комитета:

- *Архипкин Василий Григорьевич* — д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией когерентной оптики, ИФ СО РАН (г. Красноярск)
- *Вайнштейн Илья Александрович* — д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой физических методов и приборов контроля качества, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург)
- *Ветров Степан Яковлевич* — д-р физ.-мат. наук, проф., профессор кафедры теоретической физики и волновых явлений, ИИФиРЭ СФУ (г. Красноярск)
- *Втюрин Александр Николаевич* — д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., заведующий баз. кафедрой фотоники и лазерных технологий, ИИФиРЭ СФУ (г. Красноярск)
- *Вьюнышев Андрей Михайлович* — канд. физ.-мат. наук, заместитель директора по научной работе, ИФ СО РАН (г. Красноярск)
- *Зырянов Виктор Яковлевич* — д-р физ.-мат. наук, проф., руководитель научного направления "Фотоника", заведующий лабораторией молекулярной спектроскопии, ИФ СО РАН (г. Красноярск)
- *Калитеевский Михаил Алексеевич* — д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории нанофотоники, АУ РАН (г. Санкт-Петербург)
- *Карпов Сергей Васильевич* — д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник лаборатории когерентной оптики, ИФ СО РАН (г. Красноярск)
- *Кратасюк Валентина Александровна* — д-р биол. наук, проф., заведующий кафедрой биофизики, ИФБиБТ СФУ (г. Красноярск)
- *Мартынович Евгений Федорович* — д-р физ.-мат. наук, проф., директор, Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН (г. Иркутск)
- *Милёхин Александр Германович* — д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией ближнепольной оптической спектроскопии и наносенсорике, зам. директора, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск)
- *Наумов Андрей Витальевич* — д-р физ.-мат. наук, член-корр. РАН, доц., заведующий кафедрой теоретической физики им. Э.В. Шпольского, руководитель лаборатории физики перспективных материалов и наноструктур, МПГУ (г. Троицк)
- *Непомнящих Александр Иосифович* — д-р геол.-минерал. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории физики монокристаллов, ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск)
- *Овчинников Олег Владимирович* — д-р физ.-мат. наук, проф., декан физического факультета, ВГУ (г. Воронеж)
- *Садреев Алмаз Фаттахович* — д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией теории нелинейных процессов, ИФ СО РАН (г. Красноярск)
- *Светличный Валерий Анатольевич* — канд. физ.-мат. наук, доц., заведующий лабораторией новых материалов и перспективных технологий, ТГУ (г. Томск)
- *Слабко Виталий Васильевич* — д-р физ.-мат. наук, проф., профессор баз. кафедры фотоники и лазерных технологий, ИИФиРЭ СФУ (г. Красноярск)

- *Слюсарева Евгения Алексеевна* — д-р физ.-мат. наук, доц., профессор баз. кафедры фотоники и лазерных технологий, заместитель директора по научной работе ИИФиРЭ СФУ (г. Красноярск)
- *Тимофеев Иван Владимирович* — д-р физ.-мат. наук, доц., заведующий лабораторией фотоники молекулярных систем, ИФ СО РАН (г. Красноярск)
- *Чиркин Анатолий Степанович* — д-р физ.-мат. наук, проф., профессор кафедры общей физики и волновых процессов, МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва)
- *Шамирзаев Тимур Сезгирович* — д-р физ.-мат. наук, доц., ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии соединений АЗВ5, ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск)
- *Шандаров Станислав Михайлович* — д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник НОЦ "Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии", ТУСУР (г. Томск)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

- *Минаков Андрей Викторович* — д-р физ.-мат. наук, директор института инженерной физики и радиоэлектроники СФУ

Заместитель председателя:

- *Втюрин Александр Николаевич* — д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., зав. базовой кафедрой фотоники и лазерных технологий ИИФиРЭ СФУ, главный научный сотрудник ИФ СО РАН

Ученый секретарь:

- *Ципотан Алексей Сергеевич* — канд. физ.-мат. наук, доцент базовой кафедры фотоники и лазерных технологий ИИФиРЭ СФУ

Состав комитета:

- *Вьюнышев Андрей Михайлович* — канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе ИФ СО РАН, научный сотрудник базовой кафедры ФилТ СФУ
- *Слюсарева Евгения Алексеевна* — д-р физ.-мат. наук, доц., профессор базовой кафедры ФилТ СФУ, заместитель директора по научной работе ИИФиРЭ СФУ
- *Тимофеев Иван Владимирович* — д-р физ.-мат. наук, доц., зав. лабораторией фотоники молекулярных систем ИФ СО РАН, зав. лабораторий нанотехнологий, спектроскопии и квантовой химии базовой кафедры ФилТ СФУ
- *Рудакова Наталья Викторовна* — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории фотоники молекулярных систем ИФ СО РАН, доцент кафедры физики СФУ
- *Слюсаренко Нина Викторовна* — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник базовой кафедры фотоники и лазерных технологий ИИФиРЭ СФУ
- *Семина Полина Николаевна* — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник международного научно-исследовательского центра спектроскопии и квантовой химии СФУ
- *Панкин Павел Сергеевич* — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории фотоники молекулярных систем ИФ СО РАН, научный сотрудник лаборатории НСиКХ базовой кафедры ФилТ СФУ
- *Пятнов Максим Владимирович* — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории фотоники молекулярных систем ИФ СО РАН, научный сотрудник лаборатории НСиКХ базовой кафедры ФилТ СФУ
- *Герасимова Марина Анатольевна* — старший преподаватель кафедры общей физики СФУ
- *Шапошников Артём Анатольевич* — учитель физики физико-математической школы СФУ



С И Б И Р С К И Й
Ф Е Д Е Р А Л Ь Н Ы Й
У Н И В Е Р С И Т Е Т

S I B E R I A N
F E D E R A L
U N I V E R S I T Y



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Л.В. КИРЕНСКОГО

Сибирского отделения Российской академии наук

ФИЦ КНЦ СО РАН

Партнеры конференции



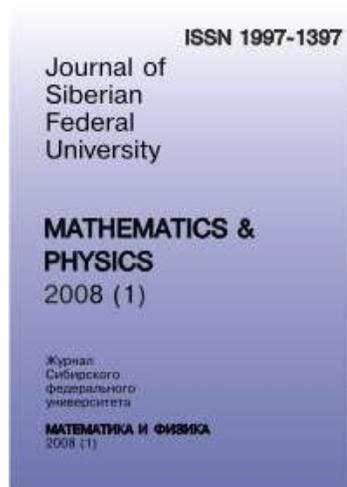
ООО ЭМТИОН



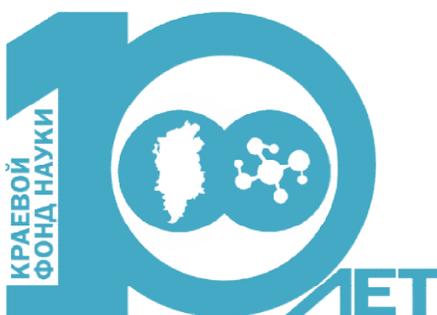
Журнал «ФОТОНИКА»
(PHOTONICS RUSSIA)



Журнал «Известия Российской
академии наук.
Серия физическая»



Журнал СФУ.
Математика и физика



Красноярский краевой фонд поддержки научной
и научно-технической деятельности

СОДЕРЖАНИЕ

секция 3	ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ, МЕТАМАТЕРИАЛЫ И ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ФАЗЫ	9
секция 4	БИОФОТОНИКА	98

Секция 3

ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ, МЕТАМАТЕРИАЛЫ и ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ФАЗЫ

СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ В ФОТОНИКЕ

А. А. Богданов^{1*}

¹*Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.*

*E-mail: a.bogdanov@metalab.ifmo.ru

Связанные состояния в континууме представляют собой яркий пример того, как решение простой задачи квантовой механики, полученное около столетия назад, может послужить стимулом к изучению целого спектра резонансных явлений в волновой физике. Связанные состояния в континууме благодаря гигантскому радиационному времени жизни нашли широкое применение в различных областях, изучающих волновые процессы, в частности, в гидродинамике, атомной физике и акустике. В докладе будет представлена история развития этого направления, основные физические механизмы образования связанных состояний в континууме, и современные достижения в этой области. Также будет обсуждаться перспектива практических приложений связанных состояний в континууме в фотонике и радиофизике.

**СВОЙСТВА 1D МАГНИТОФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ
ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ,
МЕТОДА РАЗЛОЖЕНИЯ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ
И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВИСМУТ-ЗАМЕЩЕННОГО
ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

С.Л. Ефремова^{1,2}, Д.П. Куликова^{1,2}, А.А. Касьянов¹, Е.М. Сгибнев¹, А.В. Шелаев¹,
П.Н. Тананаев¹, К.Н. Афанасьев^{1,3}, А.В. Барышев^{1,*}

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова
127030, Российская Федерация, Москва, ул. Суцневская, д. 22*

*E-mail: baryshev@vniia.ru

²*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1*

³*Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук
125412, Москва, ул. Ижорская, 13, Россия*

Анализируются структурные и оптические особенности брэгговских зеркал на основе различных пар оксидов. Предложены материалы и технологические шаги для улучшения свойств магнитофотонных кристаллов (МФК) на основе висмут-замещенного железиттриевого граната ($\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$). Представлены результаты изготовления стехиометрических оксидных слоёв с помощью метода разложения металлоорганических соединений и их кристаллизации с получением $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ как посредством отжига в муфельной печи, так и с помощью лазерного излучения в различных газовых атмосферах.

После выхода работы Розенберга [1], утверждающей, что «фарадеевское вращение плоскости поляризации света может быть значительно увеличено, если поместить магнитооптический материал в резонатор», был проведён ряд исследований, посвящённых тому, как усилить фарадеевское вращение, миниатюризировать и применить на практике устройства с такими уникальными свойствами. Значительная часть работ, посвящённых изучению фундаментальных свойств магнитооптических резонаторов – магнитофотонных кристаллов (МФК) – и их применению, была систематизирована в обзоре, опубликованном в 2013 году [2]. МФК являются уникальными структурами для усиления магнитооптических свойств известных материалов, которое происходит вследствие локализации света, они служат в качестве элементов пространственных модуляторов света [3], представляют интерес для оптических сенсоров [4]. В настоящее время актуальной задачей является отработка технологии изготовления гранатов как ключевого материала для МФК, так и для монолитной интеграции для волноводных магнитооптических изоляторов и циркуляторов [5-7].

Для улучшения магнитооптических свойств МФК нами продемонстрирован подход к изготовлению МФК со структурой Фабри-Перо резонатора, где материалом резонаторного слоя является висмут-замещённый железиттриевый гранат ($\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$), полученный методом термического разложения металлоорганических солей. Поскольку кристаллизация граната происходит при высокой температуре, были проведены исследования изменения структурных и оптических свойств брэгговских зеркал под влиянием отжига. Определена наиболее оптимальная пара оксидов для брэгговских зеркал, устойчивых к отжигу, и установлены изменения показателей преломления и структурных свойств монослоёв этих оксидов. Показано, что для изготовленного магнитофотонного кристалла наблюдается усиление фарадеевского вращения на порядок по величине на длине волны падающего излучения, соответствующей Фабри-Перо резонансу [8].

С помощью метода разложения металлоорганических соединений на кварцевых подложках изготовлены стехиометрические оксидные слои. Проведена их кристаллизация с получением $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ посредством отжига как в муфельной печи, так и лазерным излучением. Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что формируются нанокристаллические $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ плёнки, при этом имеющие незначительную шероховатость

и хорошую оптическую однородность [9, 10]. Изготовленный гранат характеризуется фарадеевским вращением $-4^\circ/\text{мкм}@510\text{ нм}$ ($x = 0,5$) и $-12,5^\circ/\text{мкм}@510\text{ нм}$ ($x = 1,5$), которое превышает величины, полученные в работе [11].

Кристаллизация граната лазерным излучением проводилась как на воздухе, так и в газовой ячейке при подаче O_2 , N_2 или Ar . Внимание уделялось возможности кристаллизации (i) в локальной микро-области и (ii) в бескислородной атмосфере. Обнаружено, что микро-области, подвергавшиеся кристаллизации, инертны к кислотам и прочно связаны с кварцевой подложкой, а области исходной оксидной плёнки смываются. Детальные исследования формирующихся кристаллических фаз проведены с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния. Обнаружено, что для любой из использованных атмосфер существует диапазон мощностей излучения, при которых возможна кристаллизация граната. Для наилучших образцов $\text{Bi}_{0,5}\text{Y}_{2,5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ величины фарадеевского вращения составляли $\approx 2,5^\circ/\text{мкм}@500\text{ нм}$ в атмосфере Ar в том числе; наименьшая величина составляла $\approx 1,7^\circ/\text{мкм}$ в случае N_2 . Предложенный метод является перспективным как для кристаллизации граната в случаях, когда нет доступа кислорода, так и для формирования граната в локальных областях, т. е. в качестве составной части фотонного устройства.

С. Л. Ефремова и Д. П. Куликова выражают признательность Фонду развития теоретической физики и математики (БАЗИС) за финансовую поддержку.

Список литературы

1. R. Rosenberg, C.B. Rubinstein, and D.R. Herriott. Resonant Optical Faraday Rotator // *Appl. Opt.*, vol. 3, pp. 1079–1083, 1964.
2. Magnetophotonics: From Theory to Applications / ed. M. Inoue, M. Levy, and A.V. Baryshev. Springer, 241 p, 2013.
3. S. Kharratian, H. Urey, and M.C. Onbaşlı. RGB magnetophotonic crystals for high-contrast magneto-optical spatial light modulators // *Sci. Rep.*, vol. 9, p. 644, 2019.
4. N.K. Dissanayake, M. Levy, A.A. Jalali, and V.J. Fratello. Gyrotropic band gap optical sensors // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, p. 181105, 2010.
5. X.Y. Sun, Q. Du, T. Goto, M.C. Onbasli, D.H. Kim, N.M. Aimon, J. Hu, and C.A. Ross. Single-Step Deposition of Cerium-Substituted Yttrium Iron Garnet for Monolithic On-Chip Optical Isolation // *ACS Photonics*, vol. 2, pp. 856–863, 2015.
6. T. Mizumoto, K. Oochi, T. Harada, Y. Naito. Measurement of optical nonreciprocal phase shift in a bi-substituted $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ film and application to waveguide-type optical circulator // *Journal of Lightwave Technology*, vol. 4 (3), pp 347–352, 1986.
7. Y. Shoji and T. Mizumoto, Silicon Waveguide Optical Isolator with Directly Bonded Magneto-Optical Garnet // *Appl. Science*, vol. 9 (3), p. 609, 2019.
8. S.L. Efremova, A.V. Salatov, D.P. Kulikova, et al. On the fabrication of one-dimensional magnetophotonic crystals from various oxides and metal-organic decomposition-made $\text{Bi}_{0,5}\text{Y}_{2,5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ // *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 54 (50), p. 505305, 2021.
9. Y. Sgibnev, A. Shelaev, D. Kulikova, et al. Crystallization of Bismuth-Substituted Yttrium Iron Garnet under Low-Energy High-Repetition Rate Femtosecond Laser Pulses // *Cryst. Growth Des.*, vol. 22 (2), pp. 1196–1201, 2022.
10. A. Shelaev, Y. Sgibnev, S. Efremova, P. Tananaev, A. Baryshev. Micron-scale crystallization of Bi:YIG by laser rapid thermal annealing at controlled atmosphere // Submitted to *Optics and Lasers in Engineering*, 2022.
11. I. Nadinov, O. Kovalenko, J. L. Rehspringer, M. Vomir, L. Mager, Limits of the magneto-optical properties of Bi: YIG films prepared on silica by metal organic decomposition // *Ceramics International*, vol. 45 (17), pp. 21409–21412, 2019.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

П. В. Долганов^{1*}, К. Д. Бакланова¹

¹*Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна Российской академии наук
142432, Российская Федерация, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 2
E-mail: pauldol@issp.ac.ru

Представлены результаты исследований хиральных жидкокристаллических фотонных кристаллов. Изучены пространственно модулированные структуры с различным типом упорядочения. Обсуждаются нетривиальные спектральные характеристики хиральных структур.

Хиральные жидкие кристаллы образуют разнообразные фотонные структуры с необычными и уникальными оптическими свойствами. При высокой хиральности среды образуются трехмерные фотонно-кристаллические структуры или голубые фазы [1]. Голубые фазы могут рассматриваться как пространственно упорядоченные структуры топологических дефектов. Другой нетривиальной упорядоченной (пространственно модулированной) структурой, образующейся в жидкокристаллических средах, являются конфокальные домены, впервые описанные в смектических жидких кристаллах со слоевым упорядочением. Конфокальные домены содержат пару сопряженных сингулярностей, в частности, эллипс и гиперболу. Слои в конфокальных доменах образуют циклиды Дюпена [2]. У истоков исследования этих структур стояли классики физики конденсированного состояния Фридель [3] и Брэгг [4], а также видные учёные в области жидких кристаллов. Несмотря на длительную историю исследования хиральных доменов, остаются открытыми ряд вопросов относительно их структуры и оптических свойств.

В докладе представлены результаты оригинальных исследований фотонных структур в хиральных жидких кристаллах. Исследовались вещества с различным шагом холестерической спирали от 0.2 мкм до 10 мкм. Кроме традиционной и хорошо известной холестерической фазы (одномерной спиральной фотонной структуры), образуется ряд других периодических фотонных структур с одномерным, двумерным и трехмерным упорядочением. Обсуждаются различные методы получения упорядоченных структур, в том числе при внешнем воздействии (электрическое поле, температура, механические воздействия).

Нами проведены комплексные исследования структуры хиральных нематиков. Получена периодическая структура, в том числе с параметром решетки несколько десятков микрон. Продемонстрированы уникальные спектральные свойства периодических структур с многоуровневым упорядочением. Обсуждается связь фотонных свойств исследованных структур с закономерностями самоорганизации материи в этих структурах.

Исследование поддержано грантом РФФИ 18-12-00108.

Список литературы

1. P. Oswald, P. Pieranski, Nematic and Cholesteric Liquid Crystals: Concepts and Physical Properties Illustrated by Experiments. Boca Raton: Taylor and Francis, 2005.
2. M. Kleman, O.D. Lavrentovich, Soft Matter Physics: An Introduction. New York: Springer, 2003.
3. G. Friedel, Les états mésomorphes de la matière // Ann. Phys., vol. 18, p. 273, 1922.
4. W. Bragg, Focal Conic Structures // Transactions of the Faraday Society, vol. 29, pp. 1056-1060, 1933.

ПОДАВЛЕНИЕ И УСИЛЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАФЕН-СОДЕРЖАЩЕМ БРЭГГОВСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ

С. В. Елисеева*, Д. И. Семенцов

Ульяновский государственный университет
432700, Российская Федерация, Ульяновск, ул. Льва Толстого, д.42
*E-mail: eliseeva-sv@yandex.ru

Рассмотрен микрорезонатор с диэлектрическими брэгговскими зеркалами и рабочей полостью, заполненной мелкослоистой средой *графен – окись кремния*. Рассмотрены случаи, когда графен в структуре находится в пассивном или активном состояниях. Показана трансформация спектров прохождения и отражения с возможностью усиления при изменении энергетического состояния графена.

Известно, что управление материальными параметрами структур с содержанием графена возможно за счет изменения его химического потенциала (энергии Ферми) и созданием возбужденного энергетического состояния за счет подачи разности потенциалов на слой графена или оптической (инжекционной) накачки [1,2]. Рассмотрим симметричную структуру $(\text{SiO}_2/\text{Si})^5(\text{Gr}/\text{SiO}_2)(\text{Si}/\text{SiO}_2)^5$, образованную двумя брэгговскими зеркалами (БЗ) и разделяющей их мелкослоистой средой, состоящей из чередующихся слоев графена и окиси кремния. Каждое из БЗ состоит из пяти периодов структуры (SiO_2/Si) , которая включает слои с диэлектрическими проницаемостями (ДП) ϵ_{SiO_2} , ϵ_{Si} , и соответствующими толщинами d_1 , d_2 . Мелкослоистая среда (Gr/SiO_2) состоит из слоев графена толщиной d_{gr} и окиси кремния толщиной d_{SiO_2} , $\theta = d_{\text{gr}}/d_{\text{SiO}_2}$.

В длинноволновом приближении ($d_{\text{gr}} + d_{\text{SiO}_2} \ll \lambda$) компоненты эффективной ДП среды $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{\text{ef}}$, $\epsilon_{zz} = \epsilon_{\text{ef}}^0$ могут быть представлены в виде:

$$\epsilon_{\text{ef}} = \frac{\epsilon_{\text{SiO}_2} d_{\text{SiO}_2} + \epsilon_{\text{gr}} d_{\text{gr}}}{d_{\text{gr}} + d_{\text{SiO}_2}} = \frac{\epsilon_{\text{SiO}_2} + \theta \epsilon_{\text{gr}}}{\theta + 1} = \frac{1}{\theta + 1} \left(\epsilon_{\text{SiO}_2} - \frac{4\pi\sigma''}{\omega d_{\text{SiO}_2}} + i \frac{4\pi\sigma'}{\omega d_{\text{SiO}_2}} \right),$$

$$\epsilon_{\text{ef}}^0 = \frac{\epsilon_{\text{gr}} \epsilon_{\text{SiO}_2} (d_{\text{SiO}_2} + d_{\text{gr}})}{d_{\text{gr}} \epsilon_{\text{SiO}_2} + d_{\text{SiO}_2} \epsilon_{\text{gr}}} = (1 + \theta) \frac{\epsilon_{\text{gr}} \epsilon_{\text{SiO}_2}}{\theta \epsilon_{\text{SiO}_2} + \epsilon_{\text{gr}}}.$$

При записи ϵ_{ef} учтено, что для графена ДП ϵ_{gr} связана с его поверхностной проводимостью $\sigma = \sigma' + i\sigma''$ соотношением $\epsilon_{\text{gr}} = 4\pi i \sigma / \omega d_{\text{gr}}$, где ω – частота. В реальных структурах параметр $\theta \ll 1$.

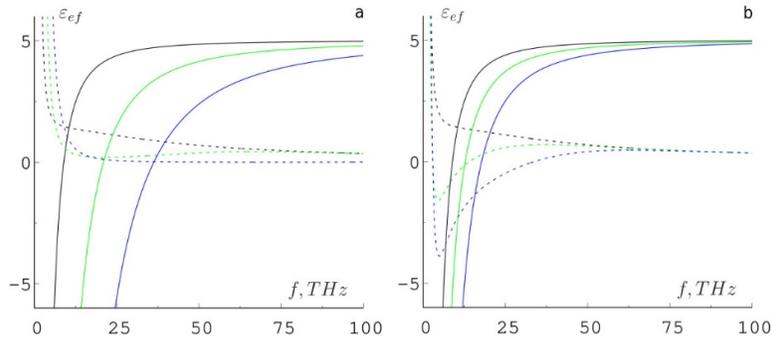


Рис. 1. Частотная зависимость действительной и мнимой части ДП эффективной среды (сплошная и штриховая кривые): для допированного графена $E_F = 0, 100, 300$ meV (a), инвертированного графена $E_F = 0, 30, 70$ meV (b) (черная, зеленая и синяя кривые).

Из представленных на рис. 1 зависимостей следует, что в обоих случаях возбуждения графена имеется область частот, где величина ϵ'_{ef} отрицательна. В этой области среда является непрозрачной, и объемная волна при распространении в ней должна затухать.

На частотах, где действительная часть проводимости графена является отрицательной, мнимая часть эффективной ДП также отрицательна (реализуется лишь для инвертированного графена).

В докладе будут представлены результаты анализа особенностей спектров отражения, пропускания и поглощения микрорезонатора (МКР), в рабочую вакуумную полость которого вводится слой полуволновой толщины эффективной графен-содержащей среды. Для МКР структуры с управляемым слоем, заполняющим полость, передаточная матрица, связывающая поле волны на входе и выходе из структуры, имеет вид $G = (N_1 N_2)^5 N_{ef} (N_2 N_1)^5$. Передаточные матрицы отдельных слоев имеют вид:

$$N_j = \begin{pmatrix} \cos k_j L_j & i \sqrt{\varepsilon_j} \sin k_j L_j \\ (i / \sqrt{\varepsilon_j}) \sin k_j L_j & \cos k_j L_j \end{pmatrix},$$

где для БЗ $j = 1, 2$ и $k_j = \omega \sqrt{\varepsilon_j} / c$ – константы распространения в диэлектрических слоях. Для слоя в резонаторной полости $\varepsilon_3 = \varepsilon_{ef}$, $k_3 = \omega \sqrt{\varepsilon_{ef}} / c$. Присутствие в МКР эффективной графеновой среды приводит к появлению в фотонных спектрах поглощения и к частичному или полному подавлению дефектной моды (рис. 2), а также к существенной зависимости характера спектров от энергетического состояния графена.

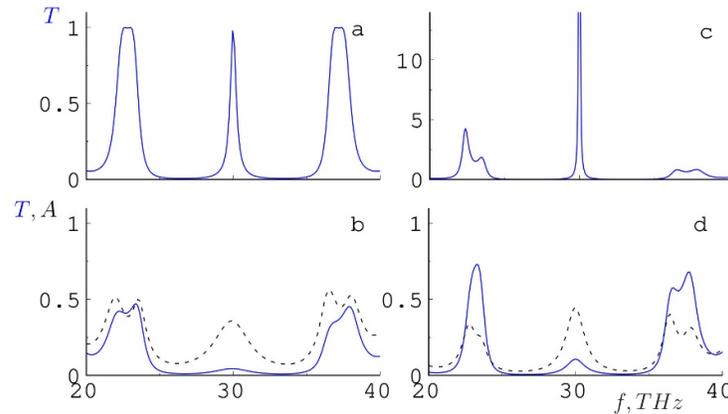


Рис. 2. Спектры прохождения и поглощения в первой запрещенной зоне (сплошная и штриховая кривые) для МКР со свободной полостью (а), занятой эффективной средой с пассивным графеном (б), инвертированным графеном при $E_F = 70$ meV (с), легированным графеном при $E_F = 100$ meV (д).

Так, варьирование энергией (квазиэнергией) Ферми позволяет не только осуществлять их перестройку, изменяя в широких пределах отражение, прохождение и поглощение падающего на структуру излучения, но и создавать условия для усиления взаимодействующего со структурой излучения или полного его подавления (полного отражения).

Работа проведена в рамках государственного задания № 0830-2020-0009.

Список литературы

1. О.В. Полищук, Д.В. Фатеев, В.В. Попов // Физика и техника полупроводников, том. 52, вып. 12, с. 1430-1435, 2018.
2. V. Ryzhii, T. Otsuji, M. Ryzhii, V.G. Leiman, S.O. Yurchenko, V. Mitin and M.S. Shur // Journal of Applied Physics, 2012, T. 112, iss.10, p.104507.

МЕТАПОВЕРХНОСТИ В МАГНИТООПТИКЕ И ОПТОМАГНЕТИЗМЕ

Д. О. Игнатьева^{1,2,3*}

¹Российский квантовый центр (ООО «МЦКТ»), 143025 Московская обл., Сколково, Новая ул., 100

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119992, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2

³Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского,
295007, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4

*E-mail: ignatyeva@physics.msu.ru

Метаповерхности представляют собой наноструктуры субволновой толщины, обладающие особыми оптическими свойствами, отличающимися от свойств обычных материалов. Оптические метаповерхности с магнитными материалами проявляют необычные магнитооптические и оптомагнитные свойства. Широкие возможности по управлению излучением благодаря взаимодействию с мета-атомами позволяют «конструировать» магнитооптическое взаимодействие и реализовывать новые магнитооптические эффекты. В то же время, ряда новых эффектов можно добиться и применяя магнитные метаповерхности для возбуждения спиновых колебаний при помощи обратных магнитооптических эффектов.

Физика метаматериалов как направление оптики и радиофизики появилась примерно в начале 2000-х годов, когда стала активно развиваться идея создания искусственных структурированных сред, состоящих из элементов с характерными размерами менее длины волны, и обладающих уникальными эффективными свойствами, не присутствующими природным материалам. С практической точки зрения, создание метаматериалов макроскопического размера для излучения видимого диапазона, оказалось малореальным в виду трудоемкости изготовления трехмерных массивов наноэлементов макроскопического размера. Поэтому на смену концепции метаматериалов в оптику пришла концепция метаповерхностей. Метаповерхности – наноструктуры субволновой толщины, обладающие особыми оптическими свойствами, существенно отличными от свойств гладких пленок из тех же материалов. «Мета-атомы» – наноэлементы, из которых состоят метаповерхности, могут быть изготовлены методами электронной литографии из самых разных материалов, от диэлектриков до металлов. Оптические свойства всей метаповерхности могут определяться как свойствами индивидуальных «мета-атомов» (т. н. локализованные моды), так и их расположением в решетке (т. н. решеточные моды).

В случае, если в метаповерхность входят магнитные материалы, намагничивание такой структуры модифицирует оптические моды: изменяет их распределение поля, дисперсию, поляризацию. В результате магнитооптический отклик всей метаповерхности становится существенно отличным от магнитооптического отклика гладкой магнитной пленки. Путем создания условий для оптического резонанса на определенной длине волны, появляется возможность усиления магнитооптических эффектов. Более того, вследствие особенностей собственных мод метаповерхностей могут появиться новые магнитооптические эффекты, отсутствующие или пренебрежимо малые в гладких магнитных пленках и кристаллах. Так, например, было продемонстрировано гигантское усиление меридионального эффекта Керра при углах падения, близких к нормали [1,2], гигантское усиление экваториального эффекта Керра в прозрачных структурах [3], гиромагнитные свойства в видимом диапазоне и экваториальный эффект Керра в s-поляризации света [2,4], и ряд других интересных свойств [5,6].

Магнитооптические метаповерхности интересны для практических приложений. Так, гигантское усиление экваториальных и меридиональных магнитооптических эффектов важно для магнитометрии для измерения плоскостных компонент поля, а также в схеме накачка-зондирование для проведения измерений с намагниченностью вблизи нормали к пленке. Высокодобротные магнитооптические резонансы в метаповерхностях перспективны для применения в сенсорных технологиях.

Не менее интересные возможности дает и возможность управления поляризацией

и локализацией излучения в магнитных метаповерхностях при возбуждении различных оптических резонансов. В то время как на гладкую пленку воздействие идет практически однородно по всей ее толщине, в случае использования метаповерхности даже в гладких пленках существуют локальные пятна с высокой интенсивностью излучения в них. Возбуждение спиновых волн за счет обратных магнитооптических эффектов, таких, как обратный эффект Фарадея, обратный эффект Коттона – Муттона и др., идет преимущественно в этой области. Это позволяет эффективно возбуждать стоячие спиновые волны, или спин-волновые резонансы внутри пленки. Поскольку сама метаповерхность обычно чувствительна к характеристикам оптического излучения (его поляризации, длине волны, углу падения) в результате оптомагнитного взаимодействия получается локальный и перестраиваемый источник возбуждения различных спиновых мод и резонансов в магнитных пленках.

Подводя итоги, можно сказать, что, хотя экспериментальные исследования магнитных метаповерхностей начаты буквально в последние несколько лет, уже видны перспективы их использования, связанные с особенными магнитооптическими и оптомагнитными свойствами. Путем дизайна метаповерхности (выбора наноструктур, их материалов, геометрических размеров, расположения) возможно «конструировать» не только оптические свойства метаповерхности, но и магнитооптический и оптомагнитный отклик. Магнитные метаповерхности оказываются перспективны для целого ряда приложений, включая сенсорику, магнитометрию, телекоммуникационные системы, а также спинтронику.

Исследование поддержано РФФ №21-72-10020.

Список литературы

1. Bsawmaii, L., Gamet, E., Neveu, S., Jamon, D., and Royer, F. Magnetic nanocomposite films with photo-patterned 1D grating on top enable giant magneto-optical intensity effects // *Optical Materials Express*, 12(2), 513-523, 2022.
2. Xia, S., Ignatyeva, D., Liu, Q., et al. Circular displacement current induced anomalous magneto-optical effects in high index Mie resonators // *arXiv preprint arXiv:2108.00615*, 2021.
3. Voronov, A. A., Karki, D., Ignatyeva, D. O., Kozhaev, M. A., Levy, M., & Belotelov, V. I. Magneto-optics of subwavelength all-dielectric gratings // *Optics Express*, 28(12), 17988-17996, 2020.
4. Ignatyeva, D. O., Karki, D., Voronov, A. A., et al. All-dielectric magnetic metasurface for advanced light control in dual polarizations combined with high-Q resonances // *Nature communications*, 11(1), 1-8, 2020.
5. Zimnyakova, P. E., Ignatyeva, D. O., Karki, D., et al. Two-dimensional array of iron-garnet nanocylinders supporting localized and lattice modes for the broadband boosted magneto-optics // *Nanophotonics*, 11(1), 119-127, 2022.
6. Xia, S., Ignatyeva, D. O., Liu, Q., et al. Enhancement of the Faraday effect and magneto-optical figure of merit in all-dielectric metasurfaces // *ACS Photonics*, acsphotonics.1c01692, 2022.
7. Chernov, A. I., Kozhaev, M. A., Ignatyeva, D. O. et al. All-dielectric nanophotonics enables tunable excitation of the exchange spin waves // *Nano letters*, 20(7), 5259-5266, 2020.

ТАММОВСКИЕ ПЛАЗМОНЫ

М. А. Калитеевский

197101 Российская Федерация, Университет ИТМО, С.- Петербург, Кронверкский проспект, 49
*E-mail: m.kaliteevski@mail.ru

В 1932 И.Е. Тамм показал, что на границе кристалла и вакуума возможна локализация электронов [1]. В 1990 было продемонстрировано, на границе потенциального барьера и периодического потенциала возможно появление локализованных состояний носителей заряда [2], которые были названы «Tamm states». Таким образом, состояния, локализованные на границе непрерывной и периодической сред, или на границе двух периодических сред стали называть таммовскими состояниями [3].

Относительно недавно, локализованные состояния электромагнитного поля на границе металла и брэгговского отражателя – таммовские плазмоны (ТП) -были теоретически предсказаны и экспериментально обнаружены [4, 5]. Вообще говоря, таммовский плазмон является собственной модой резонатора Фабри – Перо, сформированным металлическим и брэгговским зеркалами, и такие структуры были давно известны. Например, для создания первых вертикально-излучающих лазеров [6], использовались именно такие резонаторы. Несмотря на очевидность ТП, они привлекли значительное внимание исследователей (работа [4] к настоящему времени процитирована более 500 раз).

Вероятно, интерес к ТП обусловлен тем, что в [4] и некоторых последующих работах [7, 8] как собственное решение волнового уравнения, которое может быть использовано для управления модовой структурой электромагнитного поля (в соответствии с подходом к электродинамике как к проблеме собственных значений [9]). В частности, формирование гибридных состояний ТП и собственных поляритонных мод резонатора может приводить к трёхмерной локализации экситонных поляритонов [10], формированию макроскопических когерентных состояний [11], другим эффектам.

Также следует отметить технологичность структур на основе таммовских плазмонов: для формирования трёхмерно-локализованного оптического состояния произвольной структуры достаточно напечатать на поверхности брэгговского отражателя произвольную двумерную картину из металла (как правило серебра или золота). В частности, это нашло применение для изготовления источников одиночных фотонов [12]. Использование ТП позволяет многократное использование эпитаксиальных структур на основе брэгговских отражателей (которые достаточно трудоемки) для изготовления резонаторов: вместо того чтобы выращивать сложную структуру, можно на брэгговский отражатель нанести металл произвольной конфигурации, затем смыть его (без разрушения экспериментальной структуры), и нанести металлический объект с другими характеристиками.

Дизайн электромагнитных мод на основе ТП, позволяет существенно подавлять поглощение света металлическими слоями [13], что позволяет создавать структуры, в которых металлические слои являются одновременно элементами оптической схемы и металлическими контактами. Можно также добиться полного поглощения света при использовании ТП, что может быть полезным для изготовления фотодетекторов и фотоакустических генераторов ультразвука.

Таммовские плазмоны являются аналогами моды Фабри – Перо, их волновой вектор и частота находятся внутри светового конуса, в то время как поверхностные являются аналогом волноводной моды, но возможно преобразование таммовских плазмонов в поверхностные и наоборот [15].

Таммовские плазмоны могут быть использованы для создания излучателей света разных типов и разных спектральных диапазонов [16-18] и множества других устройств.

Работа поддержана РНФ 21-12-00304

Список литературы

1. I.E. Tamm, On the possible bound states of electrons on a crystal surface, *Sov. Fiz. Zhurn.*, 1, 733 (1932).
2. H Ohno, Observation of Tamm states in superlattices, *Phys. Rev. Lett.*, 64 2555 (1990).
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_states
4. Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror, *Phys. Rev. B*, 76 165415 (2007).
5. T. Goto, et al, Optical tamm states in one-dimensional magnetophotonic structures, *Phys. Rev. Lett.*, 101 113902 (2008).
6. Haruhisa Soda et al, GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers, *Jpn. J. Appl. Phys.* 18 2329 (1979).
7. M Kaliteevski et al, Hybrid states of Tamm plasmons and exciton polaritons, *Appl. Phys. Lett.*, 95(25) 251108 (2009).
8. M Wurdack et al, Observation of hybrid Tamm-plasmon exciton-polaritons with GaAs quantum wells and a MoSe₂ monolayer, *Nature communication* 8 259 (2017).
9. J. D. Joannopoulos et al., *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, 2008).
10. T. C. H. Liew et al, Exciton-polariton integrated circuits, *Phys. Rev. B* 82(3) 033302 (2010).
11. Brückner, R. et al. Phase-locked coherent modes in a patterned metal-organic microcavity. *Nature Photonics* 6, 322–326 (2012).
12. O. Gazzano et al, Single photon source using confined Tamm plasmon modes, *Appl. Phys. Lett.*, 100 232111 (2012).
13. M. A. Kaliteevski et al, Experimental Demonstration of Reduced Light Absorption by Intracavity Metallic Layers in Tamm Plasmon-based Microcavity, *Plasmonics*, 10(2), 281-284 (2015).
14. E. I. Girshova et al, Proposal for a photoacoustic ultrasonic generator based on Tamm plasmon structures, *Optics Express* 28(18) 26161-26169 (2020).
15. B. I. Afinogenov et al, Observation of hybrid state of Tamm and surface plasmon-polaritons in one-dimensional photonic crystals, *Appl. Phys. Lett* 103, 061112 (2013).
16. Z. Y. Yang et al, Narrowband Wavelength Selective Thermal Emitters by Confined Tamm Plasmon Polariton, *ACS PHOTONICS* 4 (9) 2212 (2017).
17. K. M. Morozov et al, Efficient UV Luminescence from Organic-Based Tamm Plasmon Structures Emitting in the Strong-Coupling Regime, *The Journal of Physical Chemistry C*, 124, 21656 (2020).
18. C. Symonds, Confined Tamm Plasmon Lasers, *Nano Letters* 13(7) 3179 (2013).

FDTD-МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА В ЗАДАЧАХ НАНОФОТОНИКИ

О. Г. Романов

Белорусский государственный университет
220030, Республика Беларусь, Минск, пр. Независимости, д. 4
E-mail: romanov@bsu.by

Представлены теоретические основы численных методов решения уравнений Максвелла и проанализированы результаты численного моделирования ряда задач нанофотоники.

В последние десятилетия с развитием вычислительной техники математическое (численное) моделирование стало исключительно важным методом исследования физических процессов. Предсказательный характер вычислительных экспериментов позволяет в значительной степени ускорить процесс проектирования новых приборов и установок, сократить затраты, связанные с разработкой тех или иных систем.

Развитие прямых численных методов решения основных уравнений электродинамики способствовало получению новых научных результатов в одной из наиболее динамично развивающейся в настоящее время области исследований – нанофотонике, объединившей широкий круг проблем взаимодействия электромагнитного излучения с наноструктурированными материалами (фотонными кристаллами, металлическими и полупроводниковыми наночастицами, метаматериалами). Сочетание малых размеров структур с преимуществами оптических методов обработки информации позволяет рассчитывать на разработку принципиально новых устройств оптической вычислительной техники. В данной области математическое моделирование зачастую играет определяющую роль в проектировании устройств с заданными параметрами, так как их непосредственное производство сопряжено со значительными материальными затратами. Одним из основных методов исследования распространения электромагнитного излучения в фотонных кристаллах является конечно-разностный метод анализа системы уравнений Максвелла во временной области (FDTD-метод) [1], позволяющий проследить пространственно-временную эволюцию электромагнитного поля внутри среды с произвольным распределением диэлектрической проницаемости.

В работе рассмотрены теоретические основы численных методов решения уравнений Максвелла и представлены результаты численного моделирования ряда задач нанофотоники. В частности, рассматриваются закономерности распространения сверхкоротких лазерных импульсов в нелинейных материалах, фотонных кристаллах, связанных волноводах, материалах с отрицательными диэлектрическими и магнитными проницаемостями (метаматериалах). Отдельное внимание уделяется анализу распространения электромагнитного излучения в квазипериодических (лабиринтных) фотонных структурах. Во всех рассматриваемых задачах прямое численное решение уравнений Максвелла позволило исследовать пространственно-временную структуру электромагнитных импульсов, проанализировать закономерности их распространения в различных структурах и материалах. Результаты исследований позволили разработать учебный программный комплекс для моделирования процессов взаимодействия лазерного излучения с нелинейными средами и наноструктурированными материалами в составе 16 виртуальных лабораторных работ, который внедрен в учебный процесс на физическом факультете Белорусского государственного университета.

Список литературы

1. A. Taflove, S.C. Hagness. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method. Artech, 852p., 2000.

СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ СТРУКТУРАХ: ОТ ТЕОРИИ К ПРИМЕНЕНИЮ

М. В. Рыбин^{1,2,*}

¹Физико-технический мегафакультет, Университет ИТМО
197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49А
²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
194021, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
*E-mail: M.Rybin@metalab.ifmo.ru

На сегодняшний день исследование связанных фотонных состояний в континууме является одним из самых горячих направлений современной фотоники. В данной работе рассматривается ряд фундаментальных и прикладных вопросов по данному направлению. Особое внимание уделяется связанным состояниям в континууме в диэлектрических фотонных структурах. В работе рассматриваются возможные применения для создания модуляторов, датчиков и источников лазерного излучения.

Связанные состояния в континууме впервые были описаны еще на заре становления квантовой механики. Как известно, квантовые состояния могут быть либо локализованными на каком-то потенциале, т. е. вероятность обнаружить частицу в таком состоянии затухает по сверхлинейному закону по мере удаления от некоторого центра отсчета, либо делокализованными. При этом локализованные частицы характеризуются дискретным спектром собственных энергий, а делокализованные сплошным. Когда энергия локализованного состояния попадает в континуальный спектр состояний, то говорят о связанном состоянии в континууме. Получается, что у частицы достаточно энергии, чтобы покинуть связывающий потенциал и улететь в окружающее свободное пространство, но в силу определенных причин этого не случается. Долгое время связанные состояния в континууме рассматривались скорее как интересные математические решения, нежели объекты исследования, значимые для широкого круга ученых. Это вызвано тем обстоятельством, что такие состояния требуют специфического пространственного распределения атомных потенциалов, которыми, к сожалению, природа не снабдила. Настоящий расцвет этого направления исследований связанных состояний в континууме вызван значительными успехами в развитии нанотехнологий и появлением искусственных фотонных структур. Сочетание этих двух факторов позволяет создавать фактически произвольные структуры с характерными размерами особенностей существенно меньшими по сравнению с длиной волны. При переходе к фотонным структурам диэлектрическая проницаемость среды, по которой распространяется фотон, играет роль атомного потенциала для электронов. При этом важно отметить, что фотоны всегда находятся в континууме электромагнитных состояний пространства, поэтому возможность эффективной локализации света имеет большой потенциал практического применения. Существенное внимание уделяется диэлектрическим фотонным структурам, состоящим из резонансных элементов (искусственным атомам), в которых могут возбуждаться моды Ми. В отличие от металлических фотонных структур, диэлектрические структуры можно масштабировать в самом широком спектральном диапазоне от радиочастот до видимого света. Также существенным является доступность высокоиндексных оптических материалов (кремний и другие полупроводники) с относительно низкими показателями поглощения.

Важно отметить, что обладающие бесконечным временем жизни связанные состояния в континууме являются идеализацией, поскольку поддерживающая их структура должна иметь бесконечный размер хотя бы в одном из пространственных направлений. Кроме этого, эффекты диссипации энергии приводят к ограничению времени жизни состояний. Также структурные элементы искусственных фотонных структур в отличие от атомов не являются тождественными частицами, что приводит к неизбеж-

ному отклонению реальных образов от моделей за счет дефектов, на которых возникает дополнительное рассеяние волны. Тем не менее, в реальных образцах могут существовать высокодобротные суперрезонансные моды, имеющих ту же самую физику удержания световой волны [1]. Отметим, что наряду с суперрезонансными модами используется термин квази-связанные состояния в континууме для обозначения того же самого явления. В настоящей работе рассматриваются широкий круг вопросов, включая наблюдение связанных состояний в континууме в волноводах и метаповерхностях, работающих в терагерцевом диапазоне [2,3] и возможность существования суперрезонансных мод даже в одиночных структурных элементах [4,5]. Устойчивость суперрезонансных мод к беспорядку по положению структурных элементов, как было обнаружено, сильно зависит от типа моды и ориентации беспорядка [6]. Также появляются интересные эффекты вызванные локализацией волн в неупорядоченных системах.

Большое внимание к применению суперрезонансных мод связано с их высокой добротностью. В частности, обсуждается возможность создания модулятора, переключаемого за времена, сравнимые с периодом осцилляции суперрезонансного состояния. Для этого такое состояние реализуется в терагерцевой метаповерхности, свойства которой модулируются фемтосекундными оптическими импульсами высокой интенсивности за счет инжекции носителей заряда [7]. Узкие линии высокодобротной моды, поддерживаемой даже одиночным элементом, позволяют создавать чувствительные оптические датчики, включая радиочастотные термосенсоры, могут работать как в конфигурации связи через ближнее, так и через дальнее поле [8]. Кроме этого, большое время жизни суперрезонансных мод открывает широкие возможности для появления компактных и эффективных источников когерентного света, таких как низкопороговые лазеры [9].

Автор благодарит поддержку фонда РФФИ (грант 21-19-00677).

Список литературы

1. M. Rybin, Y. Kivshar, *Nature*, vol. 541, pp. 164-165, 2017.
2. S. Han, M. V. Rybin, P. Pitchappa, Y.K. Srivastava, Y. S. Kivshar, and R. Singh, *Adv. Opt. Mater.*, vol. 8, p. 1900959, 2020.
3. S. Han, P. Pitchappa, W. Wang, Y.K. Srivastava, M.V. Rybin, R. Singh, *Adv. Opt. Mater.*, vol. 9, p. 202002001, 2021.
4. M. V. Rybin, K. L. Koshelev, Z. F. Sadrieva, K. B. Samusev, A. A. Bogdanov, M. F. Limonov, and Y. S. Kivshar, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, p. 243901, 2017.
5. A.A. Bogdanov, K.L. Koshelev, P.V. Kapitanova, M.V. Rybin, S.S. Gladyshev, Z.F. Sadrieva, K.B. Samusev, Y.S. Kivshar and M. F. Limonov, *Adv. Photon.*, vol 1, p. 16001, 2019.
6. E.E. Maslova, M.V. Rybin, A.A. Bogdanov, Z.F. Sadrieva, *Nanophotonics*, vol. 10, pp. 4313-4321, 2021.
7. S. Han, L. Cong, Y. K. Srivastava, B. Qiang, M. V. Rybin, A. Kumar, R. Jain, W. X. Lim, A. V. Gopal, S. S. Prabhu, Q. Wang, Y. S. Kivshar, and R. Singh, *Adv. Mater.*, vol. 31, p. 1901921, 2019.
8. I. Yusupov, D. Filonov, A. Bogdanov, P. Ginzburg, M.V. Rybin, A. Slobozhanyuk, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 119, p. 193504, 2021.
9. A. Tripathi, H.-R. Kim, P. Tonkaev, S.-J. Lee, S.V. Makarov, S.S. Kruk, M.V. Rybin, H.-G. Park, and Y. Kivshar, *Nano Lett.*, vol. 21, pp. 6563-6568, 2021.

НАСТОЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ СВЯЗАННЫХ СОСТОЯНИЙ В КОНТИНУУМЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВСТАВКАМИ

А. С. Пилипчук^{1*}, Е. Н. Булгаков¹, А. Ф. Садреев¹

¹Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, д. 50/38

*E-mail: artem-s-pilipchik@iph@mail.ru

Q-фактор определяется отношением энергии запасенной в резонаторе к мощности излучения в открытое радиационное пространство. Эту мощность легко погасить излучение, покрыв резонатор отражательным слоем металла или вложив резонансную моду в стоп-зону фотонного кристалла (ФК). Однако этот простой путь лишает возможности управления резонансными модами внешними источниками света. Поэтому большой интерес вызывает идея деструктивной интерференции двух резонансов, которая происходит в процессе взаимодействия и гибридизации резонансных мод при варьировании физических параметров резонатора [1]. В результате ширина линии одной из гибридных мод может даже обратиться в ноль, приводя к запиранию моды в резонаторе, что и является причиной возникновения связанных состояний в континууме (ССК) [2]. Это легко устроить в случае одного континуума в открытых микроволновых или акустических резонаторах [3], но не проходит в диэлектрических резонаторах в открытом пространстве в силу отсутствия частотных порогов на световой линии.

Хорошо известным способом открыть пороги для радиационных каналов является периодические структуры, которые приводят к дискретизации радиационных континуумов в виде дифракционных порядков. История ССК в ФК структурах изложена в обзоре [4]. Однако на практике добротность ССК ограничивается материальными потерями и к тому же периодические структуры не являются компактными. Поэтому весьма плодотворной оказалась идея приложить явление взаимодействия резонансов к одному резонатору, например, в виде диска в процессе варьирования толщины диска, что позволяет в разы поднять Q-фактор за счет деструктивной интерференции низших мультипольных излучений [5]. Дальнейшее развитие этого подхода в процессе варьирования большего количества параметров в системе из 2, 3 и 4-х дисков разных размеров показала удивительную тенденцию нарастания Q-фактора в геометрической прогрессии, что дало феноменально большое значение, порядка одного миллиона, в системе всего четырех кремневых дисков с разными толщинами [6].

В докладе также внимание уделяется проблеме, как обойти проблему роста материальных потерь с ростом числа резонаторов. Для этого предлагается ограничить миевские радиационные потери за счет вложения всего лишь одного или двух диэлектрических резонаторов в пространство, ограниченное металлическими плоскостями, например, в металлический волновод, как показано на Рис. 1 слева.

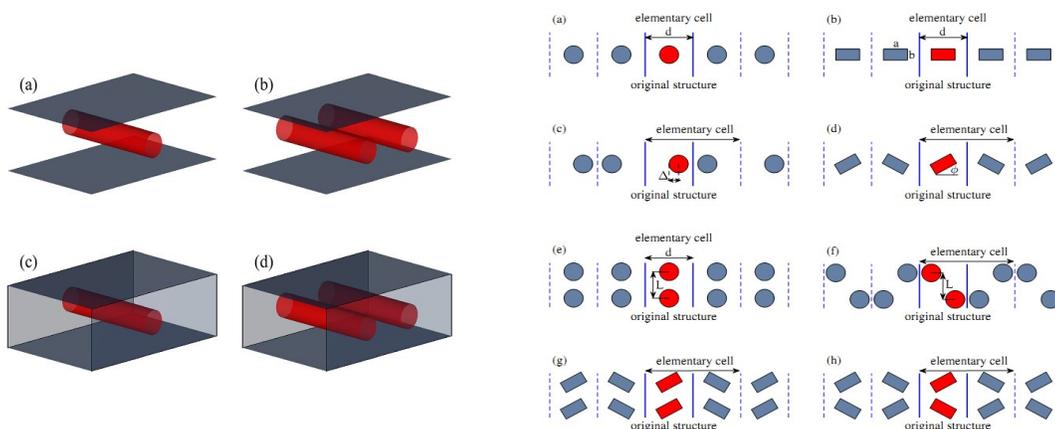


Рис. 1. Слева реальная система одного или двух диэлектрических резонаторов, вложенных в металлический волновод. Справа периодические структуры, чьи решения эквивалентны решениям уравнений Максвелла для системы слева.

В силу граничных условий для электромагнитного поля на стенках волновода мы получаем огромное многообразие периодических структур, показанных справа на Рис. 1, позволяющих получить практически все известные типы ССК: защищенные по симметрии, случайные, Фабри – Перо и ССК, защищенные топологически. Более того, в пространстве различных параметров, указанных на Рис. 1 справа, нами были обнаружены явления коалесценции ССК в процессе варьирования параметров, как показано на Рис. 2.

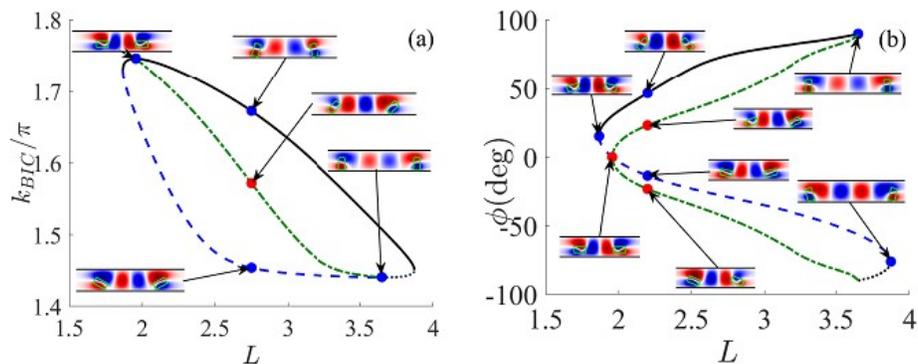


Рис. 2. Явление коалесценции ССК в процессе варьирования параметров.

Список литературы

1. В.Б. Штейншлейгер, Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах // Оборонгиз, 1955.
2. H. Friedrich and D. Wintgen, Interfering resonances and bound states in the continuum // Physical Review A., vol. 32 (6), pp. 3231, 1985.
3. A.F. Sadreev, Interference traps waves in open system: Bound states in the continuum // Reports on Progress in Physics., 2021.
4. К.Л. Кошелев и др. Связанные состояния непрерывного спектра в фотонных структурах // Physics–Uspekhi., pp. 65, 2022.
5. M.V. Rybin et al., High-Q supercavity modes in subwavelength dielectric resonators // Physical review letters., vol. 119 (24), pp. 243901, 2017.
6. K.N. Pichugin, A.F. Sadreev, E.N. Bulgakov, Ultrahigh-Q system of a few coaxial disks // Nanophotonics., vol. 10(17), pp. 4341-4346, 2021.

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

С.М. Шандаров¹, Е.Н. Савченков¹, Н.И. Буримов¹, А.Р. Ахматханов², М.А. Чувакова²,
В.Я. Шур², В.Н. Навныко³

¹*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 40*

*E-mail: stanislavshandarov@gmail.com

²*Уральский федеральный университет
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19*

³*Мозырский государственный педагогический университет*

Рассмотрены динамические голограммы и доменные структуры в фоторефрактивных сегнетоэлектрических кристаллах соответственно: механизмы, обеспечивающие их формирование; создаваемые ими возмущения физических свойств кристаллов; взаимодействие и дифракция световых волн; некоторые приложения фоторефрактивных кристаллов, связанные с адаптивной интерферометрией и фотовольтаическими пинцетами, а также доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах, для преобразования спектральных характеристик и электрооптической модуляции лазерного излучения. Представлены результаты экспериментальных исследований, теоретического анализа и приложений фоторефрактивных голограмм в кристаллах силленитов и ниобата лития. Рассмотрены дифракционные методы изучения периодических доменных структур в кристаллах ниобата и танталата лития.

Рассматриваются основные физические явления, проявляющиеся при создании световыми пучками динамических решеток в фоторефрактивных кристаллах. Анализируются диффузионный и фотовольтаический механизмы формирования периодического поля пространственного заряда картиной интерференции световых пучков. При рассмотрении фотовольтаического механизма перераспределения заряда в полуограниченных образцах уделяется внимание периодическим эванесцентным электрическим полям, создаваемым над их границами. Описываются возмущения компонент диэлектрического тензора, создаваемые электрическими полями периодических структур в кристаллах, связанные с линейным электрооптическим эффектом, а также сопровождающими их вследствие пьезоэлектрического и флексоэлектрического эффектов упругими деформациями, обусловленные фотоупругими свойствами среды. Для кубических гиротропных кристаллов рассмотрены возмущения компонент псевдотензора гирации, вызываемые электрическими полями за счет эффектов электрогирации и флексогирации [1].

Представлены результаты анализа встречного и попутного видов взаимодействия стационарной опорной волны с фазово-модулированной объектной волной на динамических периодических структурах, формируемых за счет диффузионного механизма в кубических гиротропных фоторефрактивных кристаллах, и его использования в адаптивной интерферометрии. Для кристаллов с фотовольтаическим механизмом формирования периодических структур рассматриваются их применение в качестве фотовольтаических пинцетов для манипуляции микро- и наночастицами.

Описаны возмущения компонент диэлектрического тензора, создаваемые 180-градусными ненаклонными доменными стенками периодических структур, параллельными плоскости YZ и XZ в кристаллах класса симметрии $3m$, к которому относятся ниобат и танталат лития и виды дифракции световых пучков, которые могут быть на них реализованы. Представлены результаты экспериментальных исследований дифракции света на периодических доменных структурах в кристаллах ниобата и танталата лития.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания FEWM-2020-0038/3 на 2020–2022 годы.

Список литературы

1. С.М. Шандаров, А.О. Злобин, А.А. Шмидт и др. Определение материальных параметров фоторефрактивных кристаллов на основе метода адаптивной голографической интерферометрии // Оптика и спектроскопия, т. 129, с. 413–417, 2021.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

А. К. Звездин^{1*}

¹*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141700, Российская Федерация, Долгопрудный, Институтский пер., 9.*

*E-mail: zvezdin.ak@phystech.edu

Топологические материалы стали мощной объединяющей концепцией в различных областях науки и техники, от физики конденсированных сред и холодных атомов до материаловедения и квантовых вычислений. К разряду топологических материалов причисляют топологическую квантовую материю, двумерные материалы и их ван-дер-ваальсовы гетероструктуры, муаровые материалы, а также материалы и устройства для квантовых вычислений с майорановскими фермионами. Особое место среди топологических материалов занимает кристалл Флоке – физическая система с нарушенной симметрией относительно сдвига во времени, названная так по аналогии с обычным кристаллом, для которого нарушаются непрерывные трансляционные симметрии пространства.

Излагаются последние достижения в данной области, а также выявляются нерешенные проблемы и новые возможности. Формат отражает динамичный и многогранный характер этой области исследований и предназначен для поощрения обменов и дискуссий за пределами традиционных дисциплинарных границ. Мы надеемся, что это коллективное видение будет способствовать сохранению новых увлекательных вопросов и видов деятельности на стыке материаловедения, физики конденсированного состояния, разработки устройств квантовой информации, а также формированию более ясного ландшафта квантового материаловедения как нового рубежа междисциплинарного научного исследования. Доклад не претендует на то, чтобы быть всесторонним обзором, а скорее представляет собой актуальную информацию о различных областях исследований квантовых материалов с упором на последние разработки.

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ОДИНОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В КРЕМНИЕВЫХ НАНОРЕЗОНАТОРАХ ДЛЯ ЗАДАЧ НАНОФОТОНИКИ

К.В. Барышникова^{1*}, М. В. Степихова², Ж.В. Смагина³, В.А. Зиновьев³, А.В. Новиков²,
М. И. Петров¹

¹Университет ИТМО

197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А

*E-mail: k.baryshnikova@metallab.ifmo.ru

²Институт физики микроструктур РАН

603950, Российская Федерация, Нижегородская обл., д. Афонино, ул. Академическая, д. 7

³Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН

630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 13

Недавно открывшиеся технологические возможности к точному позиционированию излучателей в нанорезонаторах открывают новую степень свободы конструирования устройств нанофотоники. В рамках данного исследования были изучены одиночные островки германия-кремния в толще кремниевых нанорезонаторов. Было показано, что в зависимости от положения островка внутри резонатора изменяется эффективность возбуждения той или иной моды, что, в итоге, приводит к разрешению поляризации люминесценции по положению островка.

Резонансные диэлектрические структуры представляют собой платформу для функциональной нанофотоники. Такие структуры не только могут эффективно взаимодействовать с излучением видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов, аккумулируя и перенаправляя свет на наномасштабах, но и позволяют в режиме реального времени перестраивать свои свойства, что делает их подходящим кандидатом для широкого спектра потенциальных применений, прежде всего, в оптических линиях связи и системах обработки информации, включая квантовые компьютеры. При этом развиваемые подходы должны обеспечивать высокую эффективность взаимодействия излучения малого (в пределе – одиночного) количества излучателей с модами микро- и нанорезонаторов. Эта задача решается при помощи поиска соответствующих геометрий структур и оптимизации точечного позиционирования излучателей в них. В данной работе изучаются кремниевые-германиевые наноструктуры в кремниевых наноструктурах. Кремний и германий имеют высокие показатели преломления (3.5–4.2) и в них практически отсутствуют омические потери в ИК области, что делает их очень перспективными материалами для реализации резонансов Ми в компактных структурах [1]. Из-за высокого показателя преломления в них возбуждаются как электрические, так и магнитные резонансы, что позволяет управлять электрической и магнитной компонентой поля одновременно. В частности, для размеров 200–300 нм «низшие» электрический и магнитный дипольные резонансы проявляются в видимом и ИК диапазоне длин волн. Ширина резонанса при этом определяется, в основном, радиационными потерями. В силу вышеперечисленных свойств, кремниевые нано- и микроструктуры использовались для создания различных фотонных структур, таких как наноантенны, дискретные волноводы, метаматериалы и метаповерхности, а также для генерации излучения и биосенсорики [2]. Мы провели теоретическое моделирование высокоэффективных диэлектрических нанорезонаторов для управления поляризацией излучения одиночных источников в ближней инфракрасной области.

В рамках численного моделирования исследовалась геометрия диска на полубесконечной подложке, при этом оптическая плотность диска соответствовала кремнию в ближнем инфракрасном диапазоне, а подложки – кварцевому стеклу. Источник возбуждения представлял собой точечный диполь в теле диска, положение и ориентация диполя задавалась различным образом. Предполагалось, что направление переходов в прямом пространстве в реальных островках, задающее ориентацию диполей в моделировании, случайно; при этом разные излучатели взаимодействуют с разными модами диска, что может приводить к разрешению поляризации испускаемого структурой из-

лучения в выделенном направлении по положению источника внутри нанорезонатора. В диске диаметром 1 мкм и высотой 185 нм в диапазоне длин волн 1300-1400 нм возбуждаются моды, которые могут быть классифицированы как мультипольные Ми-резонансы, так и как моды шепчущей галереи с низким азимутальным числом. Такие моды обладают относительно низкой добротностью, что позволяет изменять амплитуду возбуждения той или иной моды на одной длине волны только за счет характеристик излучателя.

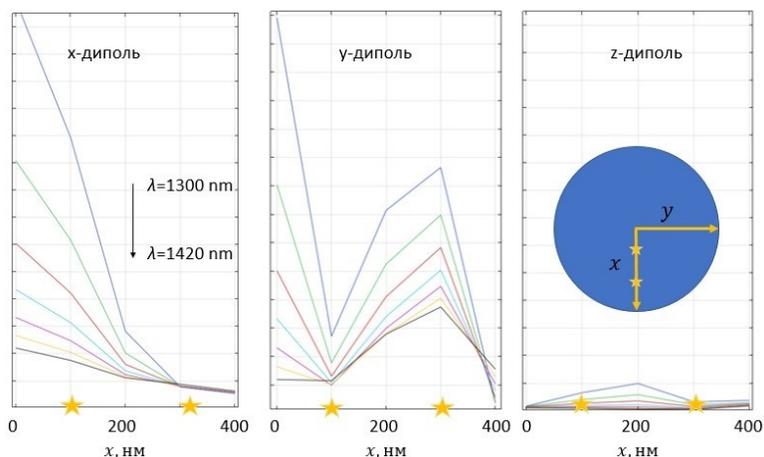


Рис. 1. Сравнение вкладов излучения в угол сбора от дипольных источников, размещённых в диске с различным положением и ориентацией

В рамках моделирования учитывался угол сбора излучения 44 градуса, соответствующий имеющейся экспериментальной установке.

При варьировании положения излучателя по радиусу диска, были обнаружены положения, в которых локальный минимум излучения в указанный угол от диполя одной ориентации совпадает со значительным вкладом диполя другой поляризации, и наоборот. При этом направления поляризации излучения в дальнюю зону перпендикулярно ориентированных диполей также ортогональны друг другу. Таким образом, за счет эффективного взаимодействия с модой соответствующей поляризации, происходит «отбор» одной из поляризаций, которая может быть зарегистрирована в эксперименте.

Также в работе исследовались наноструктуры с более сложной симметрией, а также излучатели с круговой поляризацией, о чем будет подробнее рассказано в рамках выступления.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030». Численное моделирование выполнено за счет гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2818.2022.1.2.

Список литературы

1. D.G. Baranov, D.A. Zuev, S.I. Lepeshov, et.al. All-dielectric nanophotonics: the quest for better materials and fabrication techniques // *Optica*, vol. 4(7), pp. 814–825, 2017.
2. I. Staude, and J. Schilling. Metamaterial-inspired silicon nanophotonics // *Nature Photonics*, vol. 11 (5), pp. 274-284, 2017.

ОРГАНИЧЕСКИЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ ТАММОВСКОГО ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНА

Д. А. Пыхтин¹, Р.Г. Бикбаев^{2,1*}, С.Я. Ветров^{1,2}, И.В. Тимофеев^{2,1}, В.Ф.Шабанов²

¹Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 28
*E-mail: rbikbaev@sfu-krasn.ru

²Институт физики им. Л.В. Киренского
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50 ул. Академгородок, 50, д. 38

В работе изучены спектральные свойства органического солнечного элемента на основе таммовского плазмон-поляритона, локализованного на границе раздела одномерного фотонного кристалла и фоточувствительного слоя, допированного наночастицами серебра.

Развитие солнечной энергетики идет по пути увеличения эффективности преобразования энергии. Параллельно решаются задачи увеличения надежности и снижения себестоимости органических солнечных элементов (ОСЭ). В связи с этим, широкое распространение получили методы манипуляции светом для увеличения поглощения в фоточувствительном слое (ФЧС) за счет эффекта плазмонного резонанса [1] или внедрения фотонных кристаллов (ФК) [2]. Недавно было показано, что на границе ФК и ФЧС, допированного плазмонными наночастицами, образуется таммовский плазмон-поляритон (ТПП) [3] – локализованное состояние, обеспечивающее дополнительное поглощение внутри запрещенной зоны ФК [4].

В данной работе исследовано влияние объемной концентрации плазмонных наночастиц в ФЧС на эффективность ОСЭ.

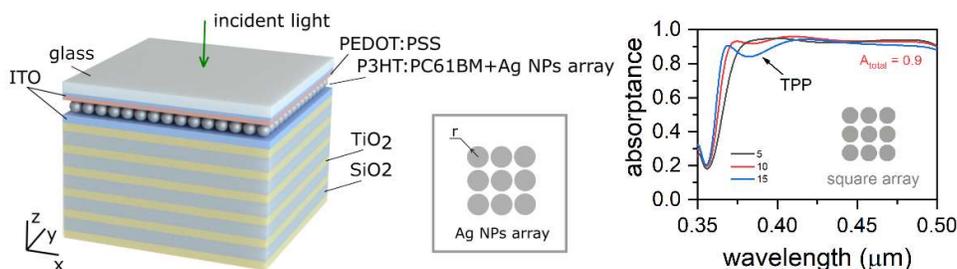


Рис. 1. (слева) Схематическое изображение предложенного ОСЭ и (справа) спектры поглощения исследуемой структуры.

Сопряжение ФК и фоточувствительного слоя, с внедренной квадратной решеткой серебряных наночастиц, приводит к возбуждению ТПП на их границе раздела. При этом максимальное интегральное поглощение в ФЧС достигается при объемной концентрации $f = 10\%$. Интегральное поглощение в ФЧС в этом случае равно 90%.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (заявка МК-46.2021.1.2).

Список литературы

1. D. Duche et.al., // Sol. Ene. Mat. and Sol. Cell., vol. 93, pp. 1377–1382, 2009.
2. W. Yu et.al., // Sol. Ene. Mat. and Sol. Cell., vol. 127, pp. 27–32, 2014.
3. M.A. Kaliteevski et.al., // Phys. Rev. B., vol. 76, pp. 165415, 2007.
4. R. G. Bikbaev et.al., // Appl. Opt., vol. 60, pp. 3338, 2021.

ГИБРИДНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТАММОВСКИЕ-МИКРОРЕЗОНАТОРНЫЕ МОДЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ

Д.С. Бузин^{1,2}, П.С. Панкин^{1,2}, Г.А. Романенко^{1,3}, А.И. Краснов^{1,2}, В.С. Сутормин^{1,2},
С.В. Наболь^{1,2}, И.А. Тамбасов¹, Ф.В. Зеленов^{4,3}, А.Н. Масюгин^{4,3}, М.Н. Волочаев^{1,3},
С. Я. Ветров^{2,1}, И.В. Тимофеев^{1,3}

¹Институт физики им Л.В Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск 660036, Россия
*E-mail: daniil.buzin.00@mail.ru

²Сибирский Федеральный университет, Красноярск 660041, Россия

³Сибирский университет науки и технологий, Красноярск 660037, Россия

⁴АО «НПП» Радиозавод», Красноярск 660021, Россия

Связанные состояния в континууме (ССК) можно найти в резонаторах на основе одномерных фотонно-кристаллических структур с включением анизотропных слоев. Вблизи ССК можно наблюдать узкие спектральные линии, что соответствует высокой добротности резонатора в этой области. Изменяя ориентацию оптической оси анизотропного слоя, можно управлять добротностью резонатора, не меняя его геометрических параметров.

Связанные состояния в континууме (ССК) — это локализованные состояния открытой системы, находящиеся в непрерывном спектре энергии, но при этом не связанные с континуумом. Вигнер и фон Нейман в 1929 году впервые обнаружили особые профили осциллирующих потенциалов, рассеиваясь на которых, частица, находящаяся в непрерывном спектре свободных энергий, остается локализованной. ССК нашли приложения и в области фотоники, например при создании лазеров, солнечных элементов и сенсоров [1-2].

Исследуемая структура (Рис. 1) представляет собой фотонный кристалл (ФК), ограниченный металлическим слоем золота с одной стороны. ФК имеет дефектный жидкокристаллический (ЖК) анизотропный слой, в котором могут возбуждаться микрорезонаторные моды. Анизотропный слой помещен между двумя проводящими слоями ИТО, что позволяет управлять поворотом директора ЖК посредством внешнего электрического поля. ФК структура состоит из периодически расположенных слоев нитрида кремния (Si_3N_4) и оксида кремния (SiO_2). На границе между ФК и слоем золота может возбуждаться таммовский плазмон-поляритон (ТПП) [3]. Количество периодов ФК структуры между ЖК и золотом подобрано так, чтобы обеспечить оптимальную связь между ТПП и микрорезонаторной модой.

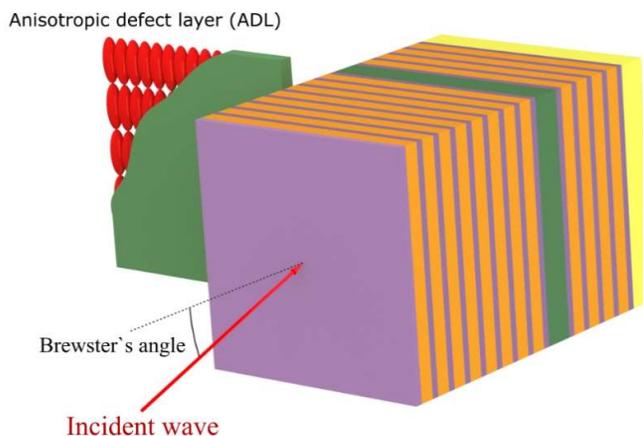


Рис. 1. Схематическая модель исследуемого фотонного кристалла (ФК): нитрид кремния (фиолетовый), оксид кремния (оранжевый), анизотропный дефектный слой жидкого кристалла (зеленый), металлическое зеркало (желтый). На вставке красным показана ориентация молекул жидкого кристалла.

При условии, что излучение в структуру вводится под углом Брюстера, ТМ-поляризованная волна проходит сквозь ФК и не локализуется в дефектном слое. ТЕ-поляризованная волна дифрагирует на периодической структуре ФК, что приводит к брэгговскому отражению, позволяющему ей локализоваться в дефектном слое. Такие локализованные моды называют ССК защищенными симметрией. Анизотропный слой позволяет перемешать ТМ- и ТЕ- поляризации и отойти от положения ССК. При повороте оптической оси ЖК относительно плоскости падения, открывается канал релаксации энергии в континуум, за счет перехода ТЕ-поляризации в ТМ-поляризацию.

На рис. 2 показан спектр пропускания исследуемой структуры в зависимости от приложенного напряжения к ЖК слою. Видны коллапсы спектральных линий при определенных значениях величины электрического поля. В окрестности этих точек можно увидеть узкие спектральные линии, что говорит о высокой добротности микрорезонатора. ЖК чрезвычайно чувствителен к внешним воздействиям. Прилагая к нему внешнее электрическое поле порядка одного вольта, или нагревая на несколько градусов, можно управлять эффективным показателем преломления ЖК. Это приводит к изменению величины связи между ТМ- и ТЕ-волнами, и как следствие, к изменению добротности микрорезонатора.

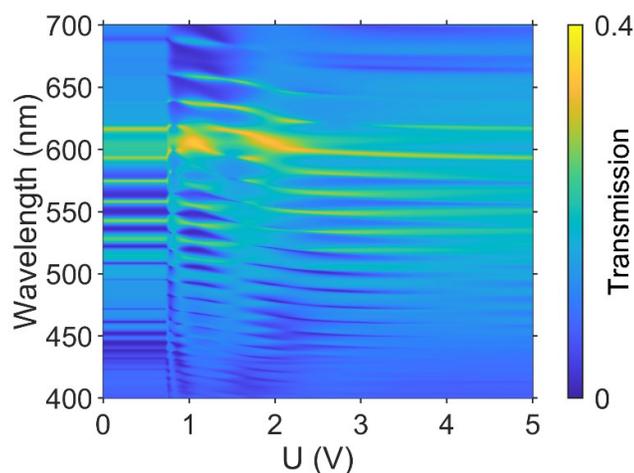


Рис. 1. Спектр пропускания ФК-структуры в зависимости от приложенного напряжения к дефектному слою

Можно рассмотреть исследуемую структуру, как два связанных резонатора, в которых по отдельности возбуждаются ТПП и микрорезонаторная мода. На рис. 2 можно увидеть расщепление резонансных линий в области 620 нм, обусловленное связью между ТПП и микрорезонаторной модой. Это приводит к образованию гибридных тамбовских мод. Величиной спектрального расщепления можно управлять, меняя количество периодов ФК между дефектным слоем и слоем золота.

Данное исследование было профинансировано Российским Научным Фондом (проект № 22-22-00687).

Список литературы

1. C.W. Hsu et al. // Nature Reviews Materials. 2016. V. 1. No 9. P. 1-13.
2. M. Kaliteevski et al. // Physical Review B. 2007. V. 76. No 16. P. 165415.
3. P. S. Pankin et al. // Communications Physics. 2020. V. 3. No 1. P. 1-8.

ОПТИКА СТРУКТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПРИ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ МЕЖДУ ИЗОТРОПНОЙ ЖИДКОСТЬЮ И ЖИДКИМ КРИСТАЛЛОМ

П. В. Долганов^{1*}, А. С. Зверев¹, Н. А. Спириденко¹, К. Д. Бакланова^{1,2}, В. К. Долганов¹

¹*Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна Российской академии наук
142432, Российская Федерация, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2*

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

²*Национальный государственный университет Высшая школа экономики
101000, Российская Федерация, Москва, ул. Мясницкая, д. 10*

Изучена структурная нестабильность жидкокристаллического перешейка между сливающимися каплями изотропной жидкости при фазовом переходе из нематической или холестерической в жидкую фазу. Определены динамические характеристики трансформации перешейка, приводящей к разрыву и образованию сателлитных капель. Трансформация оптических характеристик при разрыве иллюстрируется в докладе с использованием высокоскоростной видеорегистрации.

Изучение коалесценции капель и разрыва струй жидкости – два важных направления динамики жидкости, имеющие фундаментальный интерес для многочисленных практических приложений. Недавно нами было показано [1,2], что процесс коалесценции капель при переходе нематик-изотропная жидкость может сопровождаться нестабильностью мостика между коалесцирующими каплями, что приводит к его разрыву с образованием сателлитных капель.

В докладе представлены результаты исследований коалесценции квазидвумерных капель при переходе нематик – изотропная жидкость и холестерик – изотропная жидкость в плоских ячейках. Исследования проведены с использованием высокоразрешающей поляризованной оптической микроскопии и высокоскоростной видеорегистрации. Исследования в поляризованном свете позволили визуализировать динамику процесса, восстановить трехмерный профиль перешейка и детально исследовать временные характеристики.

Особое внимание уделялось временной трансформации перешейка нематической или холестерической фазы между коалесцирующими каплями жидкости. Трансформация происходит в несколько этапов. На начальном этапе перешеек имеет наименьшую толщину в центре. В дальнейшем образуется тонкий длинный перешеек, который испытывает нестабильность типа нестабильности Рэля-Плато. Нестабильность приводит к появлению наиболее тонких участков вблизи краев перешейка, где происходит его разрыв. Разрыв может происходить каскадным образом с образованием нескольких поколений сателлитных капель.

Изучена динамика утоньшения перешейка на этапах, предшествующих разрыву. Показано, что если на раннем этапе динамика может в основном определяться начальными условиями, на конечном этапе динамика процесса утоньшения универсальна и определяется капиллярной скоростью в вязком динамическом режиме. Показано, что утоньшение перешейка в холестерике с коротким шагом происходит существенно медленнее, чем в нематическом жидком кристалле и в холестерике с большим шагом спирали.

Исследование поддержано грантом РФФ 18-12-00108.

Список литературы

1. P.V. Dolganov, A.S. Zverev, K.D. Baklanova, V.K. Dolganov, Dynamics of capillary coalescence and breakup: quasi-two-dimensional nematic and isotropic droplets // Phys. Rev. E, vol. 104, p. 014702, 2021.

2. P.V. Dolganov, A.S. Zverev, K.D. Baklanova, V.K. Dolganov, Quasi-two-dimensional coalescence of nematic and isotropic droplets and Rayleigh-Plateau instability in flat optical cells // Soft Matter, vol. 18, p. 126-136, 2022.

ФАЗОВЫЙ СИНТЕЗ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ И КОНТУРНЫХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ И АПЕРТУР

Ю. П. Саломатов*, А. А. Ерохин, В. А. Юзова

¹Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 28
*E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

В работе рассматриваются антенны с контурными диаграммами направленности, методы фазового синтеза диаграмм направленностей по заданным требованиям к амплитудным диаграммам направленности различной формы.

Задачу синтеза диаграммы направленности (ДН) можно сформулировать следующим образом: для заданной амплитудной ДН $F_0(\Omega)$ необходимо определить амплитудно-фазовое распределение (АФР), минимизирующее функционал

$$Q(w) = \int_{\Omega} |F_0(\Omega) - F_c(\Omega, w)|^2 d\Omega$$

где Ω – телесный угол, w – АФР, а $F_c(\Omega, w)$ – синтезированная ДН.

Амплитудная ДН $|F_0(\Omega, w)|$ задается в секторе $\Omega_1 \leq \Omega \leq \Omega_2$, определяется начальное приближение для АФР $w_0(z)$, рассчитывается его ДН

$$F_c(\Omega) = |F_c(\Omega)| \exp[i\psi(\Omega)_c] = \int_{-L}^L w_0(z) \exp(-iz\Omega) dz.$$

ДН $|F_c(\Omega, w)|$ может отличаться от заданной $|F_0(\Omega, w)|$. Используя полученную фазовую ДН $\psi(\Omega)$, запишем АФР в виде преобразования Фурье полной ДН

$$I_1(z) = \int_{-\Omega_1}^{\Omega_2} |F_0(\Omega)| \exp[i\psi_0(\Omega)] \exp(-iz\Omega) d\Omega$$

Следует отметить, что

$$I_0(z) = |I_0(z)| \exp[i\phi_0(z)]$$

и амплитудное распределение сохраняется $|I_0(z)|$ во время фазового синтеза. Таким образом, мы можем переписать выражение для АФР $I_1(z)$

$$I_1(z) = |I_0(z)| \exp[i\phi_1(z)]$$

Используя фазовое распределение $\phi_1(z)$, во втором приближении находится ДН, для которой амплитудное распределение фиксировано, а фазовое распределение $\phi_1(z)$

$$\begin{aligned} \dot{F}_1(\Omega) &= |\dot{F}_1(\Omega)| \exp[i\psi_2(\Omega)] = \\ &= \int |\dot{I}_0(z)| \exp[i\phi_1(z)] \exp(-iz\Omega) dz. \end{aligned}$$

Теперь можем записать

$$\dot{I}_2(z) = \int |\dot{F}_0(\Omega)| \exp[i\phi_2(z)] \exp(-iz\Omega) d\Omega$$

и так далее. Таким образом, получим итеративный фазовый метод для произвольных форм амплитудной ДН и апертуры антенны.

ДН круглого раскрыва записывается в виде интеграла Гюйгенса-Грина [1]:

$$f(\theta, \phi) = \int_0^R \int_0^{2\pi} r I(r, \phi') e^{ikr \sin(\theta) \cos(\phi - \phi')} d\phi' dr,$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число свободного пространства, r – текущий радиус апертуры,

$I(r, \phi')$ – АФР, R – радиус раскрыва апертуры.

Предположим, что АФР в апертуре имеет осевую симметрию:

$$\dot{I}(r, \phi') = \dot{I}(r),$$

Выражение для ДН примет вид

$$\dot{f}(\rho) = \int_0^R r \dot{I}(r) J_0(2\pi r \rho) dr, \quad (1)$$

где $J_0(x)$ – функция Бесселя первого рода, нулевого порядка], $\frac{\sin(\theta)}{\lambda} = \rho$,

это позволяет записать выражение для АФР, используя выражение для обратного преобразования Фурье-Бесселя, в следующем виде

$$\dot{I}(r) = \int_0^{\frac{1}{\lambda}} \rho \dot{f}(\rho) J_0(2\pi r \rho) dr, \quad (2)$$

Поскольку ДН можно задать только в области «видимых» углов, то

$$0 \leq \rho \leq \frac{1}{\lambda}.$$

Реально осесимметричная ДН задается в значительно меньшем секторе углов ($0 \leq \theta \leq \theta_0$), поэтому интегрирование в выражении (2) выполняется в пределах

$$0 \leq \rho \leq \frac{\sin(\theta_0)}{\lambda}.$$

Таким образом процедура фазового синтеза осесимметричных амплитудных ДН, создаваемых осесимметричным АФР, будет заключаться в следующем:

1. Задаем форму ДН $\left(f_0(\rho) \right)$ в секторе углов;

2. Задаем амплитудное распределение в круглом раскрыве $\left(|I_0(r)| \right)$;

Из выражения для ДН видно, что при задании модуля амплитудного распределения $\left(|I_0(r)| \right)$ мы получим также ДН без фазового множителя. Из этого следует, что начальное АФР не может быть действительным в отличие от линейных излучателей (или несимметричных апертурных), когда используется преобразование Фурье. Для нахождения начального фазового распределения комплексной ДН может быть использован метод геометрической оптики (ГО).

3. Задаем (определяем) начальное фазовое распределение в раскрыве антенны $\left(\psi_0(r) \right)$;

4. Подставляя заданное (начальное) АФР $\left(I_0(r) e^{i\psi_0(r)} \right)$ в выражение (1) получаем первое приближение комплексной ДН начального АФР в круглом раскрыве

$$\dot{f}_1(\rho) = \left| \dot{f}_1(\rho) \right| e^{i\phi_1(\rho)};$$

5. Подставляем в выражение для АФР первое приближение комплексной ДН следующего вида, учитывая только полученное фазовое распределение

$$\dot{f}_1(\rho) = f_0(\rho) e^{i\phi_1(\rho)};$$

В результате при этом получим АФР следующего вида

$$\dot{I}_1(r) = \left| \dot{I}_1(r) \right| e^{i\psi_1(r)}.$$

6. Поскольку амплитудное распределение задано, то запишем первое приближение для АФР в виде $(I_0(r)e^{i\varphi_1(r)})$, подставим его в выражение для ДН и получим второе приближение выражения для комплексной ДН первого приближения АФР.

7. Далее выполненные пункты повторяются до нахождения «стабильного» результата.

Метод ГО используют для прямоугольных апертур при разделяющихся АФР. Для апертур произвольной формы метод ГО не применим. В случае осесимметричных круглых раскрывов и осесимметричных ДН метод ГО дает однозначное решение.

Для фазового синтеза контурной ДН антенной решетки (АР) необходимо задать начальное АФР с помощью метода ГО. Считаем, что амплитудное распределение спадает к краям, а фазовое распределение квадратично. На рисунке 1 показана контурная ДН, полученная с помощью фазового синтеза [2].

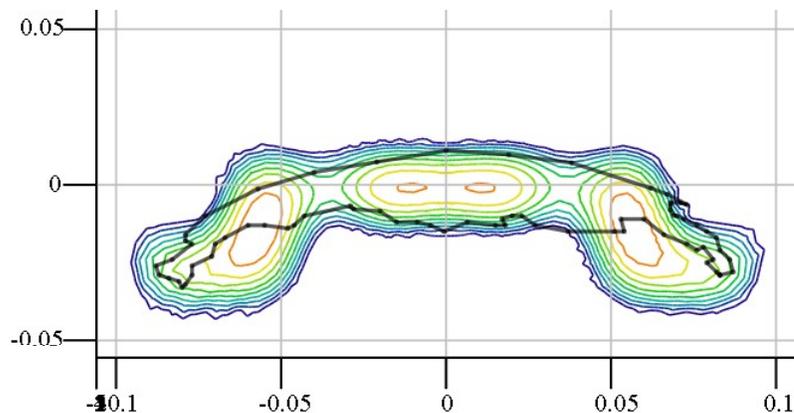


Рис. 1. Синтезированная ДН

Синтезированная ДН имеет форму близкую к заданной в виде контура РФ. Коэффициент направленного действия составил 31,3 дБ в максимуме. Следует отметить, что точность повторения маски обуславливается размером апертуры и количеством элементов АР.

Данный метод может быть использован и для формирования излучения в терагерцовом диапазоне, используя свойство «прозрачности» пористого кремния в этом диапазоне и возможность управления его электрофизическими параметрами при соответствующей технологии [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке «Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках научного проекта № 2021101507823 «Антенны наземного сегмента ГЛОНАСС для использования на территориях Крайнего Севера» и № 2022030108251 «Совершенствование систем радионавигации средневолнового диапазона».

Список литературы

1. Ю.П. Саломатов, Панько В.С., Сугак М.И. Кольцевые излучатели и антенные решетки // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – 120 с.
2. Polenga S. V. et al. A Ka-Band Shaped-Beam Circularly Polarized Reflectarray Antenna // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2019. – С. 281-284.
3. Юзова В.А., Меркушев Ф.Ф., Ляйком Е.А. Формирование сквозных структур с различной пористостью на толстых пластинах монокристаллического кремния. Известия вузов. Материалы электронной техники. 2014. Т. 17. № 1 (65). С. 8-12.

НАПРАВЛЯЕМЫЕ ВОЛНЫ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ С ОБКЛАДКАМИ ИЗ АКТИВНОГО ГРАФЕНА

Д. А. Евсеев*, А.М. Шутый, Д. И. Семенцов

*Ульяновский государственный университет
28 432017, Российская Федерация, город Ульяновск, улица Льва Толстого, дом 42.
E-mail: comrade-dmitriy@mail.ru

Исследуется зависимость волновых характеристик поверхностных волн в планарном волноводе, состоящем из двух графеновых слоев и диэлектрической прослойки, от параметров структуры и энергетического состояния графена – допированного и инвертированного.

Волновые характеристики поверхностных плазмон-поляритонов во многом определяются характером дисперсии материальных параметров граничащих сред. В последнее время актуальным является применение в волноведущих структурах графена, электронная подсистема которого под действием внешнего электрического поля может находиться в различных энергетических состояниях. В настоящей работе исследуется влияние на дисперсионные свойства поверхностной ТМ моды в волноводе, состоящем из двух слоев графена и диэлектрической прослойки, химического потенциала графена, толщины прослойки и ее диэлектрической проницаемости. Показана возможность усиления поверхностной моды в области отрицательной проводимости инвертированного графена.

Поверхностная проводимость монослоя графена определяется следующими выражениями для инвертированного и допированного графена [1,2]:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{dop}}{\sigma_0} &= \frac{8k_B T \tau}{\pi \hbar (1 - i\omega\tau)} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{E_F}{2k_B T} \right) \right] + G \left(\frac{\hbar\omega}{2}, E_F \right) - R(\omega), \\ \frac{\sigma_{inv}}{\sigma_0} &= \frac{8k_B T \tau}{\pi \hbar (1 - i\omega\tau)} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_F}{k_B T} \right) \right] + \tanh \left(\frac{\hbar\omega - 2E_F}{4k_B T} \right) - R(\omega), \\ G(\alpha, \beta) &= \frac{\sinh(\alpha / k_B T)}{\cosh(\alpha / k_B T) + \cosh(\beta / k_B T)}, \quad R = \frac{4\hbar\omega}{i\pi} \int_0^\infty \frac{G(E) - G(\hbar\omega/2)}{(\hbar\omega)^2 - 4E^2} dE. \end{aligned} \quad (1)$$

где e – заряд электрона, k_b – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, τ – время релаксации, \hbar – постоянная Планка, ω – частота, μ – химический потенциал.

На рис. 1 приведена частотная зависимость действительной части σ_{inv} и σ_{dop} для значений $\mu = 0.02, 0.06, 0.10$ eV (кривые 1-3), значению $\mu = 0$ отвечает пунктирная кривая. Наличие свободных состояний в валентной зоне обеспечивает отрицательность действительной части σ_{inv} , в результате чего становится возможным усиление в рассматриваемой структуре распространяющихся поверхностных волн (см. рис. 3).

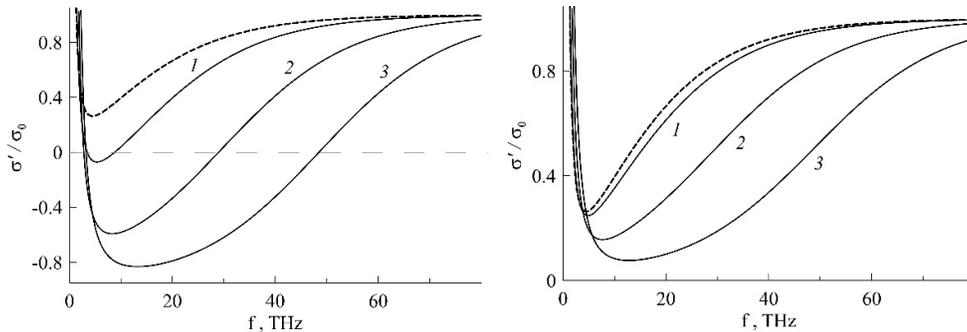


Рис. 1. Проводимость σ' инвертированного и допированного графена при различных μ .

Закон дисперсии для указанного типа волн определяется уравнением:

$$\operatorname{tgh}(q_2 d) = - \frac{\left(\frac{\varepsilon_1 q_2 + i \frac{4\pi\sigma_1 q_2}{\omega\varepsilon_2}}{\varepsilon_2 q_1} \right) + \left(\frac{\varepsilon_3 q_2 + i \frac{4\pi\sigma_3 q_2}{\omega\varepsilon_2}}{\varepsilon_2 q_3} \right)}{1 + \left(\frac{\varepsilon_1 q_2 + i \frac{4\pi\sigma_1 q_2}{\omega\varepsilon_2}}{\varepsilon_2 q_1} \right) \left(\frac{\varepsilon_3 q_2 + i \frac{4\pi\sigma_3 q_2}{\omega\varepsilon_2}}{\varepsilon_2 q_3} \right)} \quad (2)$$

где $\sigma_{1,3}$ – проводимости графеновых слоев, $\varepsilon_{1,3}$ – диэлектрические проницаемости обкладок, ε_2 – ДП прослойки, $q_{1,2,3} = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \varepsilon_{1,2,3}}$ – поперечная компонента волнового вектора в средах, β – константа распространения, k_0 – волновое число в вакууме.

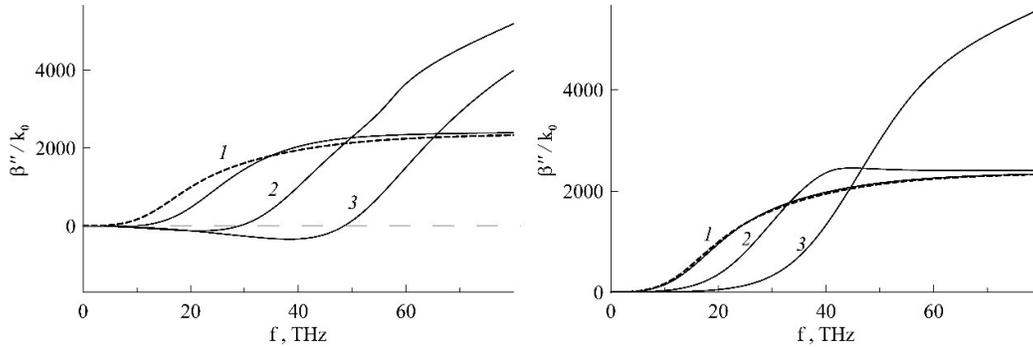


Рис. 2. Величина β'' для инвертированного и допированного графена

На рис. 2 приведена мнимая часть константы распространения для структуры с инвертированным и допированным графеном ($\mu = 0.02, 0.06, 0.10 \text{ eV}$ – кр. 1–3, $\mu = 0$ – пунктирная кр.). Видно, что области отрицательности σ' и β'' совпадают.

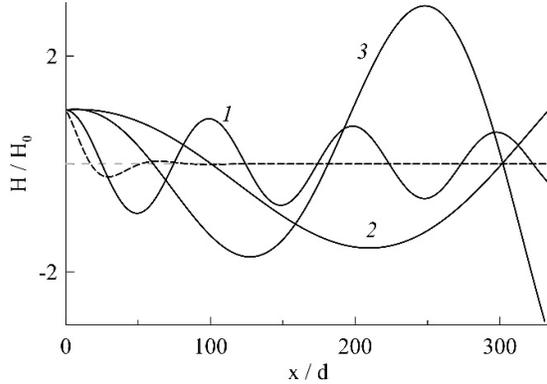


Рис. 3. Амплитуда затухающей и усиленной волн в волноводе на частоте 20 ТГц.

Частота с наибольшей величиной коэффициента усиления также оказывается монотонной функцией химического потенциала носителей заряда в графене. Его величина тоже возрастает. Показано, что изменяя тем или иным способом величину потенциала графена можно модулировать длину пробега распространяющейся волны в широких пределах, а при достаточном уровне инжекции носителей даже генерировать сигнал. Исследование поддержано МО РФ, проект 0830-2020-0009.

Список литературы

1. О.В. Полищук, Д.В. Фатеев, В.В. // Физика и техника полупроводников, том. 52, вып. 12, с. 1430-1435, 2018.
2. W. Xu, Z.H. Zhu, K. Liu. At al // OPTIC EXPRESS, 5147 с., 2015.

МОДОВАЯ БИСТАБИЛЬНОСТЬ ПЛАЗМОНОВ В СТРУКТУРЕ С ДВУМЯ ГРАФЕНОВЫМИ СЛОЯМИ

А. М. Шутый, Д. А. Евсеев*, Д. И. Семенцов

Ульяновский государственный университет
28 432017, Российская Федерация, город Ульяновск, улица Льва Толстого, дом 42.
*E-Mail: comrade-dmitriy@mail.ru

В задаче о распространении поверхностной электромагнитной волны вдоль планарного волновода с двумя графеновыми слоями, разделенными буферной диэлектрической прослойкой, выявлена модовая бистабильность, которая приводит к скачкам константы распространения в дисперсионных зависимостях.

Численный анализ показал, что в структуре, состоящей из двух графеновых слоев [1], разделенных диэлектрическим барьерным слоем ($d \leq 50$ nm для $\epsilon_b > 10$), возникает модовая бистабильность и дисперсионный скачок действительной и мнимой частей константы распространения плазмонов [2]. Причиной данного эффекта является реализация бифуркации разделения одной ветви решений на две ветви. В возникшей бистабильности лишь одна из ветвей, как правило, является устойчивой в параметрическом пространстве. Однако при изменении параметра устойчивость ветвей меняется, в результате возникают скачкообразные переходы между входящими в бистабильность ветвями. Данная бифуркация дисперсионных зависимостей характерна для различных состояний двухслойной структуры и проявляется как в случае пассивного графена, так и в случаях допированного или инвертированного состояний графеновых слоев.

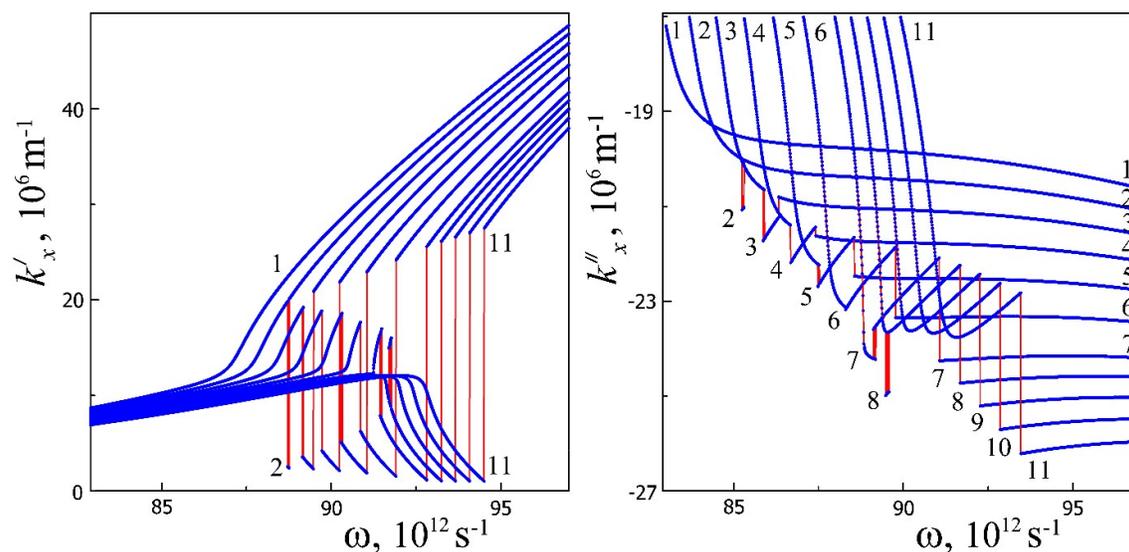


Рис. 1. Зависимости от частоты компонент КР плазмонов при различных толщинах барьерного слоя.

На рис.1 приведены зависимости действительной и мнимой частей константы распространения $k'_x(\omega)$ и $k''_x(\omega)$ при $E_F = 70$ meV, $\epsilon_b = 10$ для $d = 44, 43, 42, 41, 40, 39, 38, 37.5, 37, 36.5, 36$ nm (кривые 1–11). Из рисунка видно, что в случае кривой 1 скачок еще не наблюдается, а в случае кривых 9–11 перед скачком зависимость $k'_x(\omega)$ начинает плавно убывать, при соответствующем возрастании зависимости $k''_x(\omega)$. В остальных случаях имеет место два основных скачка: зависимости уходят на другую ветвь решений и возвращаются на исходную ветвь, при этом с уменьшением d участки реализации вто-

рой ветви возрастают. Необходимо отметить, что на некоторых участках красные линии перескока оказываются утолщенными. Это возникает в результате нескольких близко расположенных друг другу перескоков, что является следствием бистабильности.

На рис. 2 для $\epsilon_b = 10$ и $E_F = 70 \text{ meV}$ приведена зависимость от d действительной компоненты КР плазмонов на частотах $\omega = (1.705 \div 1.76) \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ (а, кривые 1–12 – через равные $\Delta\omega$) и $\omega = (0.84 \div 0.91) \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ (б, кривые 1–15 – через равные $\Delta\omega$). На рисунке (а) при уменьшении частота наблюдается возникновение бифуркации раздвоения дисперсионной ветви. При этом вначале нижняя ветви (с меньшим k'_x) оказывается неустойчивой, однако дальнейшее уменьшение частоты приводит к изменению устойчивости ветвей и расширению интервала, на котором устойчивой становится только нижняя ветвь (пунктиром на рисунке изображены некоторые неустойчивые в параметрическом пространстве участки дисперсионных зависимостей). На рисунке (б) наблюдается обратная бифуркации: при уменьшении частоты две дисперсионные ветви сливаются в одну, и скачок пропадает.

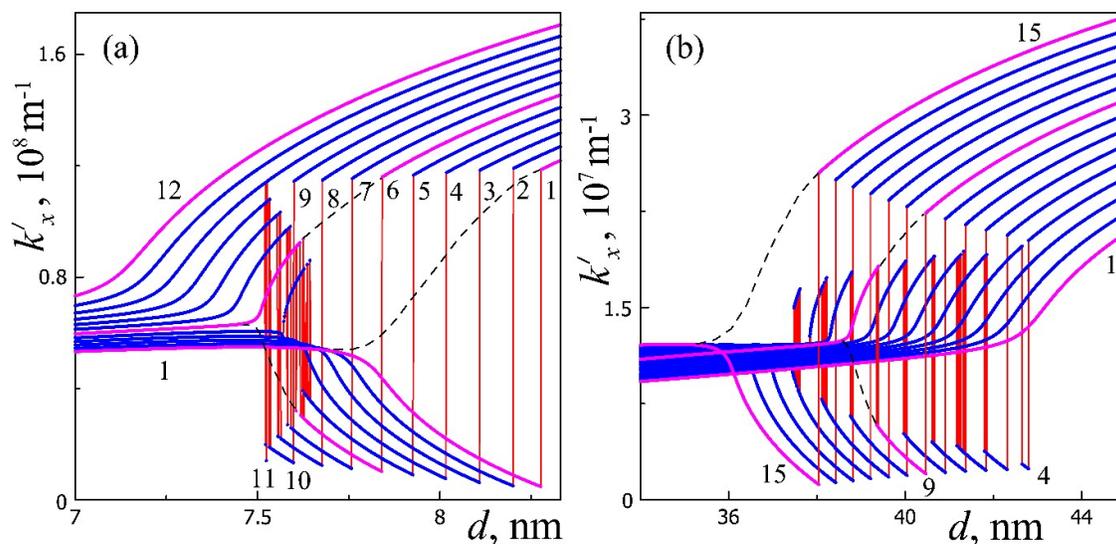


Рис.2. Зависимость от толщины барьерного слоя действительной компоненты КР плазмонов на различных частотах.

Работа проведена в рамках государственного задания № 0830-2020-0009.

Список литературы

1. О.В. Полищук, Д.В. Фатеев, В.В. Попов. // Физика и техника полупроводников, 2018, том 52, вып. 12, с. 1430-1435.
2. А.М. Шутый, Д.И. Семенцов, С.В. Елисеева. // Физика твердого тела, 2022, том 64, вып. 6, с. 724-731.

ИЗОТРОПНАЯ И АНИЗОТРОПНАЯ ДИФРАКЦИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА РЕГУЛЯРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУРАХ В ТАНТАЛАТЕ И НИОБАТЕ ЛИТИЯ

Д. А. Губинская, М. А. Федянина, Е. Н. Савченков

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 40*

* E-mail: dgubinskaya@bk.ru

Экспериментально измерена эффективность изотропной и анизотропной дифракции Брэгга различных порядков на регулярной доменной структуре в кристаллах $1\%MgO:LiTaO_3$ и $5\%MgO:LiNbO_3$.

Регулярные доменные структуры (РДС) в сегнетоэлектрических кристаллах эффективно используются для преобразования спектрального состава лазерного излучения [1]. Реальные РДС отличаются от идеальных: в доменных стенках их толщина может существенно превышать межатомные расстояния [2], могут присутствовать случайные и систематические ошибки размеров доменов, положения доменных границ, могут существовать недостающие участки с переполаризацией, ошибки в связи с дискретизацией положения доменных границ при литографическом процессе [3], и с другими технологическими особенностями формирования РДС. Одним из неразрушающих методов контроля качества РДС является дифракция света на доменной структуре в линейном режиме [4].

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментальных измерений эффективности изотропной и анизотропной дифракции Брэгга в различные порядки на РДС, сформированных методом переключения поляризации во внешнем пространственно-периодическом поле в кристаллах танталата и ниобата лития в компании Labfer LTD. Целью измерений являлось определение параметров и качества созданных РДС при проведении дальнейших работ со структурами.

В эксперименте исследовалась изотропная и анизотропная дифракция света в двух образцах кристалла конгруэнтного состава $5\%MgO:LiNbO_3$ и в стехиометрическом кристалле $1\%MgO:LiTaO_3$. Первая РДС в образце ниобата лития с размерами $40 \times 2 \times 1$ мм³ по осям X , Y и Z , имела пространственный период $\Lambda = 8.79$ мкм, угол наклона доменных стенок $\alpha = 0,31^\circ$; вторая, с соответствующими размерами $9 \times 2.5 \times 1$ мм³ – $\Lambda = 9,43$ мкм и $\alpha = 0,36^\circ$. РДС в танталате лития имела ненаклонные доменные стенки, период $\Lambda = 7.99$ мкм, и была создана в образце с соответствующими размерами $5 \times 2 \times 1$ мм³.

Экспериментальные измерения эффективности изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на исследуемых РДС проводились для света с $\lambda = 532$ нм и 633 нм на экспериментальных установках с использованием измерителя мощности «THORLABS-100D», схема которых изображена на рис. 1 а) и б), соответственно.

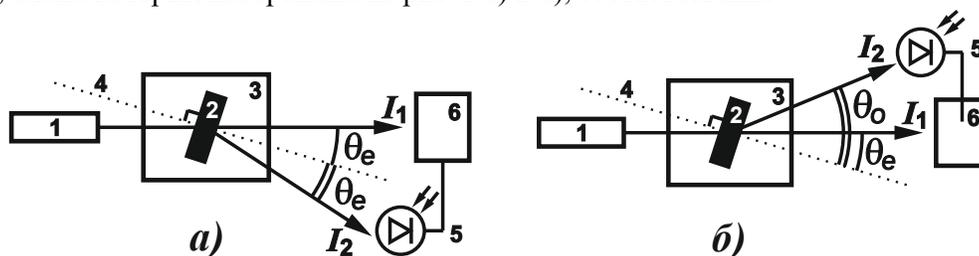


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения эффективности дифракции а) изотропной, б) анизотропной: 1 – лазер; 2 – кристалл с РДС; 3 – поворотный столик; 4 – нормаль к входной грани; 5 – фотоприемник; 6 – блок отображения измеряемой мощности THORLABS-100D;

I_1 – прошедший пучок; I_2 – дифрагированный пучок; θ_o – выходной угол обыкновенного луча, θ_e – выходной угол необыкновенного луча

Результаты по эффективности дифракции Брэгга для исследованных РДС, определяемой в процентах как $\eta_m = I_{2m} / (I_{1m} + I_{2m}) \cdot 100\%$, где I_m – измеряемые интенсивности пучков при наблюдении m -го дифракционного порядка по схемам, показанным на рис. 1, представлены в таблице 1. Отметим, что при анализе эффективности анизотропной дифракции необходимо учитывать различия в коэффициентах пропускания на выходной грани для обыкновенного и необыкновенного лучей.

Таблица 1

Эффективность изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на РДС в кристаллах LiNbO_3 ($\Lambda = 8.79$ мкм), LiNbO_3 ($\Lambda = 9.43$ мкм), LiTaO_3 ($\Lambda = 7.99$ мкм)

		<i>m</i>												
Дифр	λ , нм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
LiTaO_3 7,99 мкм	Аниз	532	0,330	0,398	0,198	0,043	0,153	0,071	0,038	-	-	-	-	-
		633	0,403	0,457	0,272	0,023	0,065	0,008	0,011	-	-	-	-	-
	Изотр	532	1,521	3,076	2,332	0,369	1,039	0,162	0,428	0,109	0,213	-	-	-
		633	1,19	1,804	1,889	0,144	0,779	0,097	0,278	0,086	0,098	-	-	-
LiNbO_3 9,43 мкм	Аниз	532	-	-	-	-	0,059	0,173	0,037	0,019	0,011	0,006	0,004	0,003
		633	-	-	-	0,175	0,072	0,029	0,012	0,006	0,003	0,002	-	-
	Изотр	532	3,251	5,372	4,318	1,267	0,447	0,194	0,081	0,041	-	-	-	-
		633	2,627	5,906	1,503	0,436	0,160	0,096	0,045	0,023	0,012	-	-	-
LiNbO_3 8,79 мкм	Аниз	532	-	-	-	-	0,159	0,094	0,044	0,021	0,010	0,006	0,004	-
		633	-	-	-	0,149	0,097	0,053	0,025	0,012	0,007	-	-	-
	Изотр	532	8,840	3,087	3,822	2,530	1,251	0,547	0,308	0,188	0,098	0,055	0,032	-
		633	5,533	2,409	2,389	1,564	0,762	0,411	0,242	0,129	0,070	0,035	-	-

Анализ полученных результатов показывает, что на РДС в кристаллах ниобата лития наблюдается анизотропная дифракция в порядке начиная с пятого для света с длиной волны $\lambda = 532$ нм и с четвертого для $\lambda = 633$ нм. В то же время, для РДС в кристалле танталата лития анизотропная дифракция наблюдается уже с первого порядка. Различия связаны со значительным двулучепреломлением $\delta n_{oe} = n_o - n_e$ в ниобате лития, по сравнению с существенно меньшим его значением для танталата лития. Полученные результаты качественно согласуются с данными [5], где были измерены эффективности изотропной и анизотропной дифракции на РДС с пространственным периодом $\Lambda = 8,79$ мкм для лазерного излучения с $\lambda = 655$ нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания на 2020–2022 годы (задание FEWM-2020-0038/3).

Список литературы

1. P. Ferraro, S. Grilli, P. DeNatale. Ferroelectric Crystals for Photonic Applications // Berlin-Heidelberg: Springer-Ferlag, 2009, 2014.
2. G. Catalan, J. Seidel, R. Ramesh, JF. Scott. Domain wall nanoelectronics. Rev. Mod. Phys. 84:119-56
3. M.M.Fejer, G.A. Magel, D.H. Jundt, R.L. Byer. 1992. Quasi-Phase-Matched Secjnd harmonic Generation:Tuning and Tolerances. IEEE J. of Quantum Electronics.n 28: 2631-2654
4. Александровский, А.Л. Линейная и нелинейная дифракционные решетки в монокристаллах ниобата лития с периодической доменной структурой / А.Л. Александровский, О.А. Глико, И.И. Наумова, В.И. Прялкин // Квантовая электроника. — 1996. — Том 23. — № 7. — С. 657–659.
5. S.M. Shandarov, A.E. Mandel, T.M. Akylbaev, M.V. Borodin, E.N. Savchenkov, S.V. Smirnov, A.R. Akhmatkhanov and V.Y. Shur. Linear diffraction of light waves on periodically poled domain structures in lithium niobate crystals: collinear, isotropic, and anisotropic geometries // J. Phys.: Conf. Series. 2017. V. 867. P. 012017.

НАПРАВЛЕННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ БЛОХОВСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ МИ-РЕЗОНАНСНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Д. Н. Гулькин^{1*}, А. А. Попкова¹, Б. И. Афиногенов¹,
Д. А. Шилкин¹, В. О. Бессонов^{1,2}, А. А. Федянин¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, 1-2,

*E-mail: gulkin@nanolab.phys.msu.ru

²ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, 119071, Российская Федерация, Москва, Ленинский пр-т., 31-4

Работа сосредоточена на обнаружении и изучении эффекта направленного возбуждения блоховских поверхностных волн при помощи одиночных полупроводниковых наночастиц, расположенных на поверхности одномерного фотонного кристалла. В работе показано, что субволновая ми-резонансная частица может выступать в качестве спектрального демультиплексора, переключающего направление возбуждения блоховской поверхностной волны с прямого на обратное в спектральном диапазоне 30 нм с центральной длиной волны, определяемой размером наночастицы. Исследование проведено методом микроскопии утки излучения, позволяющей одновременно визуализировать распространения света как в координатном пространстве, так и в пространстве волновых векторов.

Исследование платформ интегральной оптики для управления распространением света и создание элементной базы для них является важным направлением фотоники. Оптимальная платформа для реализации элементов должна отвечать современным требованиям, таким как спектральная гибкость, малые оптические потери и плотная упаковка оптических компонентов. Наряду с известными поверхностными плазмон-поляритонами (ППП) получает распространение перспективная платформа на основе блоховских поверхностных волн (БПВ) в одномерных фотонных кристаллах. БПВ представляют из себя поверхностные электромагнитные состояния на границе раздела одномерного фотонного кристалла (ФК) и диэлектрика. Использование той или иной платформы зависит от области её применения: БПВ являются многообещающей платформой для использования в интегральной фотонике на частотах от УФ до среднего ИК, поскольку БПВ обладают большой длиной распространения, превышающей в данном диапазоне длину распространения ППП. Также БПВ позволяют локализовать поле не только на поверхности ФК, но и в слое диэлектрика, позволяя таким образом использовать диэлектрические структуры на поверхности ФК в качестве элементов для управления распространением оптического излучения. Уже разработаны основные элементы интегральной оптики на основе БПВ, такие как резонаторы, интерферометры, волноводы [1]. Однако при этом сами способы возбуждения поверхностных волн являются недостаточно изученным направлением. Поскольку волновой вектор БПВ выше волнового вектора света в воздухе, то для возбуждения БПВ требуются специальные оптические схемы. Как правило, в качестве метода возбуждения БПВ используют наиболее изученные и самые простые с точки зрения эксперимента схемы: дифракционные решётки или призмённые схемы (Кречмана и Отто). Однако при этом они имеют ряд недостатков: они либо слишком громоздки (призмённые), либо малоэффективны (дифракционные). Поиск новых способов возбуждения БПВ, лишённых этих недостатков, является важной задачей.

Широкое использование в задачах для управления светом получили диэлектрические наноантенны на основе одиночных субволновых частиц с высоким показателем преломления, поддерживающих резонансы типа Ми, для которых существует возможность контролируемым способом изменять диаграмму рассеянного на частицах света. С помощью метода лазерно-индуцированного переноса данные частицы могут быть помещены на любую диэлектрическую поверхность [2], например, могут быть помещены в область локализации БПВ, позволяя, таким образом, управлять диаграммой направленности рассеянного света. Недавно с помощью ми-резонансных частиц кремния, помещённых на плёнку золота и выступающих в качестве демультиплексора, наблюдалось перестраиваемое направленное возбуждение ППП [3].

В данной работе предлагается метод цветочувствительного направленного возбуждения БПВ. С помощью метода лазерно-индуцированного обратного переноса наночастицы кремния, поддерживающие резонансы типа Ми, были помещены на поверхность ФК. Впервые экспериментально и численно продемонстрировано эффективное возбуждение резонансов типа Ми внутри кремниевых частиц, ведущих к направленному возбуждению БПВ на поверхности фотонного кристалла как в прямом, так и в обратном направлениях. Схема эксперимента проиллюстрирована на рис. 1а. Излучение направляется под углом θ на частицу, расположенную на поверхности ФК. Рассеянное на частице излучение собирается с помощью метода микроскопии утечки излучения и иммерсионного объектива ($\text{ЧА}=1.3$). В задней фокальной плоскости (ЗФП) этого объектива формируется изображение волновых векторов рассеянного на частице излучения. Подобное фурье-преобразование рассеянного излучения позволяет удобно демонстрировать эффект направленного возбуждения поверхностных волн в ЗФП, в которой БПВ выглядит как яркие дуги за пределами светового конуса ($\text{ЧА} > 1$).

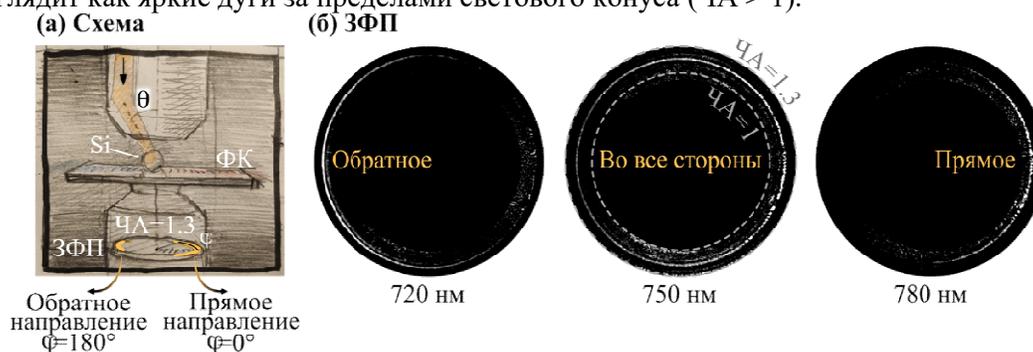


Рис. 1. Направленное возбуждение БПВ с помощью ми-резонансных частиц: а – схема эксперимента, б – изображения ЗФП для различных длин волн возбуждения для кремниевой частицы диаметром 210 нм. Яркая дуга в ЗФП в диапазоне $\text{ЧА} \in [1; 1.3]$ соответствует БПВ.

Изменяя длину волны излучения в видимой и ближней ИК-области спектра и подбирая другие параметры частиц, можно изменять условия для возбуждения БПВ. Цветоселективная направленность достигается за счёт возбуждения в частице различных резонансов типа Ми. Таким образом, одиночная кремниевая частица может действовать как субволновой демультиплексор. На рис. 1б проиллюстрировано направленное возбуждение БПВ для частицы размером 210 нм. Показано переключение направления возбуждения БПВ с преимущественно прямого на преимущественно обратное в спектральном диапазоне 30 нм. Варьируя параметры фотонного кристалла, можно управлять диаграммами возбуждения БПВ и изменять дисперсию поддерживаемых мод, что позволяет сместить рабочий спектральный диапазон в видимую область спектра. Показано, что эффективность возбуждения БПВ таким способом может составить 8% с помощью одной наночастицы для предлагаемой схемы освещения. Предложенная схема демультиплексора может быть легко интегрирована в существующие платформы и устройства методом лазерно-индуцированного переноса.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда № 21-72-00123.

Список литературы

1. K.R. Safronov, D.N. Gulkin, I.M. Antropov et al. Multimode interference of Bloch surface electromagnetic waves // ACS Nano, 14(8), 10428-10437 (2020).
2. A.I. Kuznetsov, J. Koch, V. N. Chichkov, Laser-induced backward transfer of gold nanodroplets // Opt. Express 17, 18820–18825 (2009).
3. I.S. Sinev, A.A. Bogdanov, F.E. Komissarenko et al., Chirality driven by magnetic dipole response for demultiplexing of surface waves // Laser Photon. Rev. 11, 1700168, 2017.

ПОЛУЧЕНИЕ ПЛОСКИХ ГРАФЕНОПОДОБНЫХ СТРУКТУР ПОСРЕДСТВОМ ПИРОЛИЗА ПОЛИИМИДНОЙ ПЛЁНКИ ИЗЛУЧЕНИЕМ КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИОДНОГО ЛАЗЕРА

Л. А. Хацкевич, В. М. Стяпшин*, К. Г. Михеев, Г. М. Михеев

*Институт механики, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
426067, Российская Федерация, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34*

*E-mail: vms@udman.ru

При помощи автоматизированной лазерной установки, оснащённой полупроводниковым излучателем с длиной волны 450 нм, произведён пиролиз коммерческой полиимидной плёнки толщиной 150 мкм с получением на её поверхности слоя лазерно-индуцированного графена заданной формы.

Особое внимание в науке и технике получили наноразмерные формы углерода, такие как фуллерены, нанотрубки и графен. Получение последнего в чистом виде является ресурсоёмкой задачей. Однако было установлено [1], что при лазерном пиролизе на воздухе поверхности полиимидной плёнки на ней может образовываться пористый плёночный материал, состоящий из графеноподобных лепестковых структур, называемый лазерно-индуцированным графеном (ЛИГ). Дальнейшие исследования показали, что получать ЛИГ можно практически на любом углеродсодержащем материале. При этом уменьшение ширины линии получаемого ЛИГ увеличивает диапазон возможных его применений. Специальными методами удалось достичь ширины около 10 мкм [2].

Современные автоматизированные устройства позволяют формировать слои ЛИГ любой заданной формы, например, создавая периодическую структуру, придающую поверхности гидрофобность [3]. Однако качественные лазерные установки имеют высокую стоимость. При этом на рынке присутствуют сравнительно дешёвые лазерные гравёры на основе коротковолновых диодных лазеров. Для оценки перспектив использования подобных лазерных источников при создании разнообразных устройств на основе плоских графеноподобных структур нами были проведены исследования по получению ЛИГ на поверхности коммерческой полиимидной плёнки толщиной 125 мкм при помощи импульсного диодного лазера с длиной волны 450 нм.

Сначала были изучены режимы работы лазерного источника и определены его временные и энергетические параметры. Максимальная мощность излучателя составила 5 Вт. Лазерные импульсы следовали цугами длительностью 50 мс, длительность единичного импульса в цуге по полувысоте равнялась 150 мкс. Опытным путём были определены режимы обработки, при которых на полиимидной плёнке образуется ЛИГ. Для его идентификации использовался спектрометр комбинационного рассеяния света. Параметры образуемого узора определялись при помощи оптического микроскопа. При найденных режимах были изготовлены опытные образцы плоских микросуперконденсаторов с площадью обкладок 1 см², ёмкость которых была измерена в одномолярном водном растворе серной кислоты при помощи потенциостата. Также были исследованы терморезистивные свойства ЛИГ меандроподобной формы.

Выполнено в рамках госзадания (№ 1021032422167-7-1.3.2).

Список литературы

1. J. Lin, Z. Peng, Y. Liu, et al. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers // *Nat. Commun.* vol. 5, pp. 5714 (1-8), 2014.
2. J.L. Beckham, J.T. Li, M.G. Stanford, et.al. High-resolution laser-induced graphene from photoresist // *ACS Nano*, vol. 15 (5), pp. 8976–8983, 2021.
3. W. Wua, R. Lianga, L. Lub, et.al. Preparation of superhydrophobic laser-induced graphene using taro leaf structure as templates // *Surface & Coatings Tech.*, vol. 393, pp. 125744 (1-10), 2020.

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ИНВЕРСНЫХ ОПАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ БИНАРНЫХ ОКСИДОВ ЦИРКОНИЯ И ТАТАНА

Д. Кох^{1,2*}, К. А. Шабанова^{1,2}, А. В. Шабанов³

¹Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук»,
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

³Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, строение 38
[*diter.koh@gmail.com](mailto:diter.koh@gmail.com)

Инвертированные опалы из композитов на основе оксидов циркония и титана были получены и исследованы методом растровой электронной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии.

В настоящее время большое внимание уделяется получению и исследованию нанодисперсных композитов из оксидов циркония и титана, например, исследования в области синтеза нанодисперсных фотокаталитических материалов на основе композитов состава ZrO_2-TiO_2 , полученных золь-гель методами. В зависимости от условий синтеза такие структуры обладают уникальными физико-химическими свойствами, что позволяет использовать их в качестве оптически активных материалов, селективных сорбентов, химических и фотокатализаторов, функциональной керамики [1-4].

Инверсные опалы (ИО) – это периодические структуры из субмикронных моноразмерных сферических пор со стенками из неорганических материалов, преимущественно оксидов. В настоящее время активно применяются золь-гель методы получения ИО.

Эта работа посвящена исследованию структурных особенностей инверсных опалов, полученных методом темплатного синтеза из коллоидного раствора на основе оксихлорида циркония (ОХЦ) и тетраэтоксититана (ТЭТ) с помощью растровой и просвечивающей электронной микроскопии.

Коллоидный раствор был приготовлен следующим образом: в водно-спиртовой раствор ОХЦ добавлялся по каплям ТЭТ. Сначала ТЭТ гелировал в результате гидролиза ТЭТ в присутствии воды, образуя прозрачный осадок, затем в присутствии ионов хлора гель пептизировался.

Полученным раствором пропитывали упорядоченные матрицы из монодисперсных субмикронных частиц полиметилметакрилата. Пропитанные образцы были высушены в течение 8 часов при температуре $75^\circ C$ и исследованы на растровом электронном микроскопе Hitachi SU 3500.

Дальнейший обжиг образцов для удаления темплата проводился в муфельной печи при температуре $450^\circ C$ со скоростью нагрева $2^\circ/час$, выдержка 4 часа и таким же образом при температуре $600^\circ C$, образцы были накрыты керамическими тиглями, чтобы избежать воспламенения. Структура полученных ИО была исследована методами РЭМ и ПЭМ.

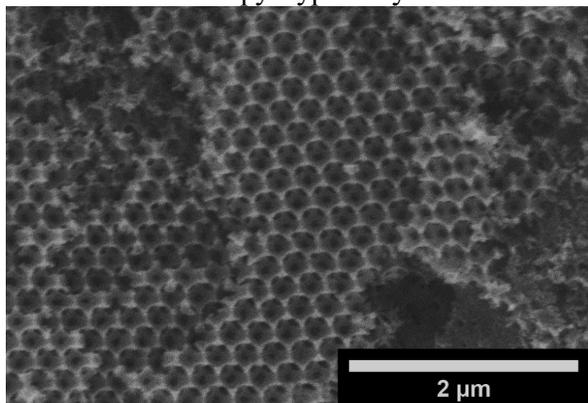


Рис. 1. РЭМ изображение инверсного опала из коллоидного раствора, смешанного состава ZrO_2-TiO_2

Результаты исследования показали, что в стесненных условиях пор опаловой матрицы оксиды циркония и титана распределяются равномерно, что позволяет получать бинарные оксидные композиты с широкими вариациями молярных соотношений Zr/Ti.

Также в зависимости от температуры обжига можно получать материалы с разной кристаллической модификацией, определяющей их фотокаталитические свойства.

Список литературы

1. V. F. Shabanov, V. Ya. Zyryanov. Photonic crystals and nanocomposites: structure formation, optical and dielectric properties: Monograph // SB RAS Publ. House, 2009.
2. E. M. Dyatlova, Y. A. Klimosh. Chemical Techlogy of Ceramics and Refractories. In 2 P // BSTU Publ. House, 2014.
3. V. F. Shabanov, V. Ya. Zyryanov. Metamaterials and Structurally Organized Media for Optoelectronics, Microwave Engineering, and Nanophotonics: A Monograph // SB RAS Publ. House, 2013.
4. V. A. Kosobukin. Photonic Crystals // Window on a Microworld Publ. House, 1989.

ОПТИЧЕСКИЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЧАСТИЦЫ ВБЛИЗИ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Н. А. Костина^{1*}, М. И. Петров¹

¹ федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

197101, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, лит. А

*E-mail: natalia.kostina@metalab.ifmo.ru

Взаимодействие света с наноразмерными частицами может обеспечить стабильный захват, перемещение по заданным траекториям, а также сортировку и упорядочивание частиц. В случае оптомеханических взаимодействий вблизи границы раздела сред, поддерживающей распространение поверхностных или объемных мод, можно выявить ряд преимуществ за счет внесения в систему дополнительных степеней свободы. В данной работе рассматриваются оптические силы, возникающие вблизи поверхности одномерных фотонных кристаллов (ФК). Показано, что на частицы, помещенные вблизи поверхности ФК, действует реактивная компонента оптической силы, которая обеспечивает притяжение или отталкивание объекта от источника излучения в зависимости от параметров структуры. Данный эффект может служить основой для перестраиваемого оптомеханического позиционирования частиц и точной сортировки резонансных частиц.

Одной из самых сложных задач в оптомеханике с момента изобретения оптического пинцета является реализация оптического притяжения наночастиц [1], что стимулирует интенсивные исследования в этой области [2]. Ранее было продемонстрировано, что оптическое притяжение может быть достигнуто за счет изменения окружающего пространства и использования нанофотонных структур: волноводных [3], поверхностных плазмонных [4] и объёмных [5] мод. Здесь мы рассматриваем в качестве таких структур одномерные фотонные кристаллы (ФК), которые, в отличие от других, позволяют осуществлять тонкую настройку режимов манипулирования посредством изменения геометрии возбуждения и уже зарекомендовали себя как перспективная экспериментальная платформа [6,7].

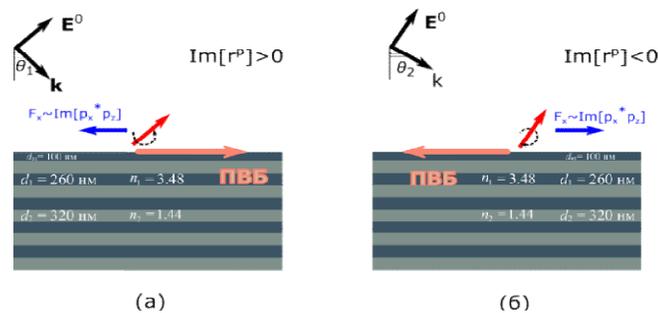


Рис. 1 Схематическое изображение падения плоской волны на частицу, расположенную над ФК. В зависимости от угла падения ПVB возбуждается в направлении (а) от источника излучения и (б) к источнику излучения, возникает составляющая оптической силы F_x связанная с реакцией излучения

Рассмотрим одиночную частицу над поверхностью ФК, на которую под углом падает плоская р-поляризованная волна (рис.1). С изменением угла падения волны $\theta_{1,2}$ для плоской волны с волновым вектором \mathbf{k} и напряженностью электрического поля \mathbf{E}^0 меняется и знак мнимой части коэффициента отражения r^P от ФК. Это, в свою очередь, обуславливает изменение знака разности фаз между компонентами наведенного дипольного момента частицы p_x и p_z , и меняет направление вращения дипольного момента на противоположное, а, значит, и направление поверхностной волны Блоха (ПVB) [8]. Таким образом, при изменении знака коэффициента отражения от ФК (за счет угла падения или длины волны излучения) свое направление меняет и реактивная компонента оптической силы, обусловленная направленной генерацией ПVB. Поскольку знак коэффициента отражения зависит от зонной структуры ФК, значение и направле-

ние оптической силы, действующей на частицу, изменяется в узких спектральных диапазонах, что может быть использовано для прецизионной сортировки частиц.

На рис. 2 показана оптическая сила, действующая на резонансные частицы типа «ядро-оболочка» с различной толщиной оболочки. С изменением соотношения ядра и оболочки (радиус частицы $R = 40$ нм, радиус ядра $R_{core} = 35, 36, 37$ нм) плазмонный резонанс частицы сдвигается в длинноволновую область. Для частиц с большей толщиной оболочки в выбранном спектральном диапазоне поведение оптической силы соответствует нерезонансному случаю, переключение знака силы наблюдается на длине волны 725 нм: $R_{core} = 35$ нм притяжение к источнику, $R_{core} = 36$ нм – отталкивание; на длине волны 800 нм: $R_{core} = 35, 36$ нм притяжение, $R_{core} = 37$ нм – отталкивание.

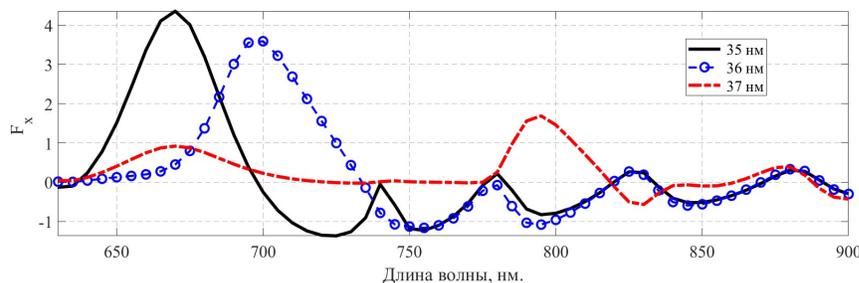


Рис. 2 Спектральная зависимость реактивной компоненты оптической силы для различных радиусов ядра резонансной частицы типа «ядро-оболочка» с оболочкой из серебра и ядром с показателем преломления $n = 2.3$.

Таким образом, мы показали, что зонная структура ФК позволяет реализовать изменение направления возбуждения ПВБ на противоположное, что приводит к изменению направления реактивной оптической силы, действующей на частицу вблизи границы раздела сред. Имеет место эффект переключения между режимами оптического притяжения и отталкивания частиц в узких спектральных диапазонах, что может быть использовано для прецизионной сортировки резонансных частиц.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-72-10141).

Список литературы

1. J. Chen, J. Ng, Z. Lin, et al. Optical pulling force // *Nat. Photonics*, vol. 5 (9), pp. 531–534, 2011.
2. H. Li, Y. Cao, L. Zhou, et al. Optical pulling forces and their applications // *Adv. Opt. Photonics*, vol. 12 (2), pp. 288, 2020.
3. F. J. Rodríguez-Fortuño, N. Engheta, A. Martínez, et al. Lateral forces on circularly polarizable particles near a surface // *Nat. Commun.*, vol. 6 (1), pp. 8799, 2015.
4. M. I. Petrov, S. V. Sukhov, A. A. Bogdanov, et al. Surface plasmon polariton assisted optical pulling force // *Laser Photonics Rev.*, vol. 10 (1) pp. 116–122, 2016.
5. A. Ivinskaya, N. Kostina, A. Proskurin, et al. Optomechanical Manipulation with Hyperbolic Metasurfaces // *ACS Photonics*, vol. 5 (11) pp. 4371–4377, 2018.
6. D. A. Shilkin, E. V. Lyubin, I. V. Soboleva, et al. Direct measurements of forces induced by Bloch surface waves in a one-dimensional photonic crystal // *Opt. Lett.*, vol. 40 (21), pp. 4883, 2015.
7. D. A. Shilkin, E. V. Lyubin, I. V. Soboleva, et al. Near-field probing of Bloch surface waves in a dielectric multilayer using photonic force microscopy // *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 33 (6), pp. 1120, 2016.
8. F. J. Rodríguez-Fortuño, G. Marino, P. Ginzburg, et al. Near-Field Interference for the Unidirectional Excitation of Electromagnetic Guided Modes // *Science*, vol. 340 (6130), pp. 328–330, 2013.

СЛОИСТЫЙ МИКРОРЕЗОНАТОР С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ

А.И. Краснов^{1,2}, П.С. Панкин^{1,2}, Д.С. Бузин^{1,2}, Г.А. Романенко^{1,3}, В.С. Сутормин^{1,2},
С.В. Наболь^{1,2}, И.А. Тамбасов¹, Ф.В. Зеленов^{4,3}, А.Н. Масюгин^{4,3}, М.Н. Волочаев^{1,3}, С.Я. Ветров^{2,1},
И.В. Тимофеев^{1,3}

¹Институт физики им Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск 660036, Россия

²Сибирский Федеральный университет, Красноярск 660041, Россия

³Сибирский университет науки и технологий, Красноярск 660037, Россия

⁴АО «НПП» Радиозавод», Красноярск 660021, Россия

Krasnov04850@mail.ru

Связанные состояния в континууме (ССК) – это безызлучательные собственные состояния открытой системы. ССК обычно разделяют на 3 типа. Первый тип ССК, впервые предложенный Вигнером и фон Нейманом, возникает при рассеянии электрона на осциллирующем потенциале. В результате деструктивной интерференции рассеянных волн, волновая функция частицы локализуется в потенциальной яме несмотря на то, что её энергия больше потенциальной ямы. Второй тип ССК возникает при изменении параметров системы. Он включает в себя ССК Фабри – Перо, ССК Фридриха – Винтгена и однорезонансные ССК. Последний тип – ССК, защищенные симметрией, возникают из-за различия в симметрии локализованных и распространяющихся волн. ССК нашли применение в лазерах для усиления нелинейных оптических эффектов и для генерации оптических пучков со специальными свойствами, таких как вихревые пучки [1].

Модель оптического микрорезонатора показана на рисунке 1. Микрорезонатор состоит из двух стеклянных подложек, с напыленными на них диэлектрическими слоями нитрида кремния и диоксида кремния. Слои чередуются с периодом, соизмеримым с длиной волны видимого света, образуя одномерный фотонный кристалл (ФК). В ФК содержится анизотропный дефектный слой представляющий собой жидкий кристалл (ЖК) 5СБ. Микрорезонатор также содержит слои ИТО и ПВА. Слои ИТО нужны для приложения поля к ЖК-слою, а слои ПВА для обеспечения планарной ориентации молекул ЖК.

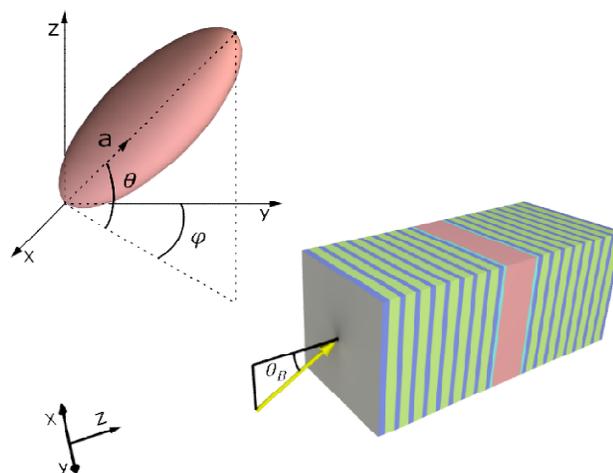


Рис. 1. Модель оптического микрорезонатора. Желтая стрелка изображает свет, падающий под углом Брюстера. Розовым цветом изображен анизотропный дефектный слой фотонного кристалла (ФК).
На вставке – ориентация оптической оси в дефектном слое

При углах поворота оптической оси ЖК относительно плоскости падения φ , равных 0 и $\pi/2$, в спектрах наблюдается коллапс резонансных линий, свидетельствующий о реализации ССК, защищенных симметрией. Они реализуются вследствие того, что при данных значениях φ локализованные ТЕ-моды не связаны с распространяю-

щимися ТМ-волнами. При изменении угла φ ширина резонансных линий изменяется, что обеспечивает возможность управления добротностью микрорезонаторных мод.

Жидкий кристалл чрезвычайно чувствителен к внешним воздействиям. Прилагая к нему внешнее электрическое поле, или нагревая его, можно управлять его эффективным показателем преломления. Это приводит к изменению величины связи между ТМ- и ТЕ-волнами, и как следствие, к изменению добротности резонатора. На рисунке 2 представлен спектр отражения микрорезонатора, рассчитанный методом Берремана, в зависимости от напряжения U , приложенного к ЖК слою. При падении света под углом Брюстера, ТЕ-волна отражается, так как находится в запрещенной зоне ФК, а ТМ-волна проходит через ФК без отражения. При повороте оптической оси ЖК, ТМ-волны переходят в ТЕ-волны, которые локализируются в микрорезонаторе. В спектре видно множество резонансных линий, соответствующих микрорезонаторным модам. При некоторых промежуточных напряжениях U наблюдается коллапс резонансных линий, свидетельствующий о реализации ССК типа Фридриха – Винтгена. Данные ССК образуются при деструктивной интерференции обыкновенных и необыкновенных волн, при их выходе из ЖК-слоя [2].

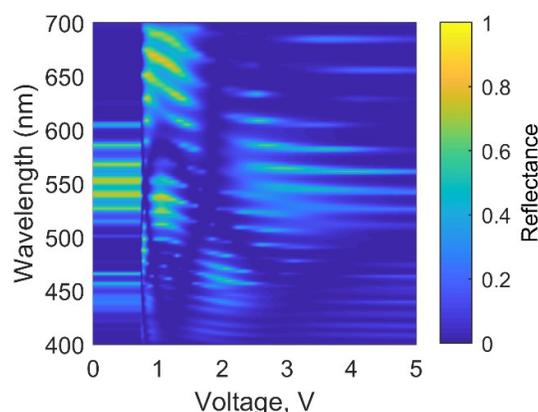


Рис. 2. Спектр отражения микрорезонатора в зависимости от приложенного напряжения U , при $\varphi = \pi/4$

Исследованы спектральные свойства микрорезонатора, состоящего из двух ФК-зеркал, с анизотропным ЖК-слоем между ними. Показана возможность управления спектральными свойствами посредством внешнего воздействия на ЖК-слой. Полученные результаты могут быть полезны для создания оптических микрорезонаторов с управляемой добротностью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-22-00687)

Список литературы

1. Azzam S. I., Kildishev A. V. Photonic bound states in the continuum: from basics to applications // *Advanced Optical Materials*. V.9, № 1, p. 2001469, 2021.
2. Pankin P. S. et al. One-dimensional photonic bound states in the continuum // *Communications Physics*. V.3, № 1, pp. 1-8, 2020.

ПРОЗРАЧНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ В ГИБРИДНОМ АНАПОЛЬНОМ СОСТОЯНИИ ДЛЯ ФАЗОВОЙ ИНЖЕНЕРИИ

А.В. Кузнецов^{1*}, А. Канос Валеро¹, М.В. Рыбин¹, А.С. Шалин^{2,3,4}

¹Университет ИТМО

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит. А.

*E-mail: alexey.kuznetsov@metablab.ifmo.ru

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

³ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН (филиал в Ульяновске)

432011, Ульяновск, ул.Гончарова 48/2,

⁴Рижский технический университет
LV-1048, Latvia, Riga, 1 Meza Street, k1

Данная работа посвящена изучению оптических свойств метаповерхностей, состоящих из цилиндрических метаатомов в недавно открытом гибридном анапольном состоянии. С помощью гибридного анапольного состояния удалось получить полностью прозрачные метаповерхности, основанные на новых принципах, которые являются альтернативной ветвью развития уже известным метаповерхностям Гюйгенса. Это исследование может быть полезным для разработки современных сверхкомпактных фотонных устройств на основе новых эффектов.

На сегодняшний день полностью диэлектрическая нанофотоника активно развивается, в частности, именно в силу ее практической значимости во многих областях науки и техники [1–4]. Огромный вклад в эту область внесли метаповерхности Гюйгенса, обеспечивающие полную прозрачность и в то же время позволяющие изменять фазу проходящего через них излучения [5,6]. Но у таких метаповерхностей есть принципиальное ограничение — связь ближних полей между элементами метарешетки [7]. Это ограничение мотивирует поиск новых концепций для получения вариации фазы 2π [8].

Недавно обнаруженное гибридное анапольное состояние [9] является неизлучающим источником, который, в отличие от обычных анаполей, совместно гасит электрический и магнитный вклады в рассеяние (рис. 1). Этот эффект можно использовать для подавления связи в дальнем и ближнем полях между метаатомами, что трудно реализовать для источников Гюйгенса. В данной работе мы предлагаем модель метаповерхности, состоящую из кремниевых нанополос в гибридном анапольном состоянии, которая будет обладать полной прозрачностью и возможностью регулировать фазу передаваемого сигнала [10].

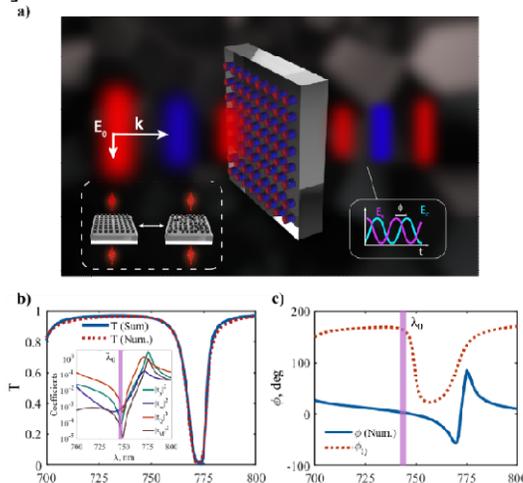


Рис. 1. Схематическое изображение предложенной метаповерхности, состоящей из кремниевых нанополос, показывающее основные преимущества: единичное пропускание, возможность регулировки фазы и практически полную независимость оптических свойств от положения нанополос, пропускание излучения с фиксированным расстоянием между метаатомами.

На рис. 1 представлена зависимость пропускания излучения через метаповерхность, состоящую из кремниевых наноцилиндров (б) и фазового сдвига излучения, прошедшего через такую метаповерхность (в), в зависимости от длины волны. На рисунке видно так называемое «окно прозрачности», которое возникает из-за гибридного анапольного состояния и сохраняется даже при плотном расположении метаатомов. Неоспоримым преимуществом такой метаповерхности является возможность нанесения ее на различные подложки с практически нулевым контрастом показателя преломления при сохранении единичного пропускания, что значительно упрощает выбор материала подложки и открывает новые возможности для практической реализации.

В результате данной работы были разработаны уникальные модели метаповерхностей, метаатомы которых находятся в недавно открытом гибридном анапольном состоянии. Такие метаповерхности обладают полной оптической прозрачностью, тем самым конкурируя с уже известными метаповерхностями Гюйгенса, работая на других принципах. Такие метаповерхности имеют много преимуществ, например, отсутствие взаимодействия метаатомов с подложкой и с соседними метаатомами. Благодаря этому появляется возможность выбора практически любой диэлектрической подложки для экспериментов, а также возможность создавать неупорядоченные метаповерхности, варьируя оптические свойства непосредственно на уровне отдельных метаатомов. Таким образом, все эти особенности способствуют развитию направления создания различных фотонных устройств на основе гибридных анапольных метаповерхностей, например сенсоров, различных линз, голографических устройств и других фотонных девайсов.

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за финансовую поддержку (договор № 075-15-2022-1150).

Список литературы

1. Kivshar Y 2018 All-dielectric meta-optics and non-linear nanophotonics *Natl. Sci. Rev.* 5 144–58.
2. Kozlov V, Filonov D, Shalin A S, Steinberg B Z and Ginzburg P 2016 Asymmetric backscattering from the hybrid magneto-electric meta particle *Appl. Phys. Lett.* 109 203503.
3. Canós Valero A, Kislov D, Gurvitz E A, Shamkhi H K, Pavlov A A, Redka D, Yankin S, Zemánek P and Shalin A S 2020 Nanovortex-Driven All-Dielectric Optical Diffusion Boosting and Sorting Concept for Lab-on-a-Chip Platforms *Adv. Sci.* 7 1903049.
4. Novitsky D V., Karabchevsky A, Lavrinenko A V., Shalin A S and Novitsky A V. 2018 PT symmetry breaking in multilayers with resonant loss and gain locks light propagation direction *Phys. Rev. B* 98 125102.
5. Decker M, Staude I, Falkner M, Dominguez J, Neshev D N, Brener I, Pertsch T and Kivshar Y S 2015 High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces *Adv. Opt. Mater.* 3 813–20.
6. Shamkhi H K, Sayanskiy A, Valero A C, Kupriianov A S, Kapitanova P, Kivshar Y S, Shalin A S and Tuz V R 2019 Transparency and perfect absorption of all-dielectric resonant metasurfaces governed by the transverse Kerker effect *Phys. Rev. Mater.* 3 1–10.
7. Olk A E and Powell D A 2019 Accurate Metasurface Synthesis Incorporating Near-Field Coupling Effects *Phys. Rev. Appl.* 11 1.
8. Rahimzadegan A, Arslan D, Dams D, Groner A, Garcia-Santiago X, Alaei R, Fernandez-Corbaton I, Pertsch T, Staude I and Rockstuhl C 2020 Beyond dipolar Huygens' metasurfaces for full-phase coverage and unity transmittance *Nanophotonics* 9 75–82.
9. Canós Valero A, Gurvitz E A, Benimetskiy F A, Pidgayko D A, Samusev A, Evlyukhin A B, Bobrovs V, Redka D, Tribelsky M I, Rahmani M, Kamali K Z, Pavlov A A, Miroshnichenko A E and Shalin A S 2021 Theory, Observation, and Ultrafast Response of the Hybrid Anapole Regime in Light Scattering *Laser Photonics Rev.* 15 2100114.
10. Kuznetsov A V., Canós Valero A, Tarkhov M, Bobrovs V, Redka D and Shalin A S 2021 Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering *Nanophotonics* 10 4385–98.

ЭФФЕКТЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ И ОБРАЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР В ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННЫХ КОНДЕНСАТАХ БОЗЕ – ЭЙНШТЕЙНА

А. Д. Аллилуев¹, Д. В. Макаров^{1*}, Н. А. Асриян², А. А. Елистратов², Ю.Е. Лозовик^{3,4,5}

¹*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, Российская Федерация, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43*

*E-mail: makarov@poi.dvo.ru

²*Всероссийский НИИ автоматики имени Н.Л. Духова
127030, Российская Федерация, Москва, ул. Суцневская, д.22*

³*Институт спектроскопии РАН
142190, Российская Федерация, Троицк, ул. Физическая, д.5*

⁴*Национальный университет «Высшая школа экономики»,
Институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова,
123458, Российская Федерация, Москва, ул. Таллинская, д.34*

⁵*Сколковский институт науки и технологий
121205, Российская Федерация, Москва, Большой бульвар, д.30, стр. 1*

Рассматривается динамика экситон-поляритонного конденсата Бозе-Эйнштейна. Разработана модель, описывающая динамику конденсата, взаимодействующего с резервуаром надконденсатных экситонов. В основе модели лежит немарковское стохастическое уравнение Гросса-Питаевского, представляющее собой интегро-дифференциальное уравнение в частных производных, правая часть которого включает в себя шумы, соответствующие экситонным и фотонным флуктуациям. Разработанная модель используется для описания процесса образования конденсата. Показано, что увеличение температуры приводит к переходу из пространственно-однородного в фрагментированное состояние конденсата, которому сопутствует образование множественных квантовых вихрей. Показано, что точка перехода соответствует снижению плотности образующегося конденсата.

Экситон-поляритон представляет собой бозонную квазичастицу, соответствующую связанному состоянию экситона и фотона в микрорезонаторе. Сильное взаимодействие экситонов между собой, а также исключительная малая эффективная масса делают экситон-поляритоны кандидатами на создание высокотемпературного конденсата Бозе-Эйнштейна. Исследование особенностей эволюции конденсата поляритонов также актуально в связи с возросшим интересом к их использованию в квантовых технологиях. Гибкость в управлении свойствами поляритонных ансамблей посредством изменения профиля накачки, геометрии микрорезонатора делает их привлекательными для симуляции многочастичных квантовых систем и создания квантовых логических элементов. В этих приложениях особенно важны понимание динамических особенностей эволюции, оценки характерных времён процессов.

Вместе с тем, экситон-поляритоны подвержены сильным процессам распада, главным образом, за счет поглощения фотонов в микрорезонаторе. Относительно долгоживущий конденсат (здесь речь идет о сотнях пикосекунд!) удастся создать только при наличии лазерной подкачки резервуара надконденсатных экситонов. Таким образом, экситон-поляритонный конденсат является существенно открытой и неравновесной квантовой системой. Сравнительно высоких времен жизни конденсата удастся добиться только при низких температурах, порядка десятков кельвинов. Это подразумевает, что резервуар характеризуется узким энергетическим спектром, а его связь с конденсатом проявляет сильные немарковские свойства.

Немарковость означает зависимость поведения динамической системы от ее предыстории, что, с одной стороны, осложняет анализ ее поведения, а с другой – существенно обогащает спектр наблюдаемых свойств. По нашим оценкам, существенные отклонения от марковского режима возникают при температурах экситонного резервуара ниже 30 К. Это вполне соответствует условиям современных экспериментов.

В настоящем докладе мы сосредоточили внимание на процессе зарождения конденсата, изучить особенности динамики, связанные с эффектами памяти, а также рас-

смотреть формирование различных пространственных структур. Будут рассматриваться как структуры, создаваемые искусственно за счет специфической конфигурации поля лазерной накачки, так и спонтанные пространственные образования (вихри, солитоны и т. д.). В качестве специфических конфигураций будут выступать наборы отдельных узких сгустков конденсата, а также кольцевые конденсаты. В качестве основного инструмента будет использовано ранее разработанное исполнителями проекта немарковское стохастическое уравнение Гросса – Питаевского.

Показано, что с ростом температуры конденсат переходит из пространственно-однородного в фрагментированное состояние с обилием вихрей. Вид пространственной структуры оказывает существенное влияние на эффективность подкачки конденсата за счет релаксации экситонов резервуара. Показано, что температура перехода из однородного в фрагментированное состояние соответствует окрестности минимума температурной зависимости плотности конденсата.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ С КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Е.Э. Маслова^{1*}, М.В. Рыбин^{1,2}

¹Университет ИТМО

197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

*E-mail: ekaterina.maslova@metalab.ifmo.ru

²ФТИ им. Иоффе

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

Мы рассматриваем полностью диэлектрические квазикристаллические структуры с магнитным откликом. Построена квазикристаллическая структура с пентагональной симметрией и рассчитано распределение электромагнитного поля в ТЕ-поляризации. Показано, что транспортные свойства в квазикристаллической структуре не отличаются от транспортных свойств в периодической. Метаматериальный режим определяется появлением однородной моды. Также была построена фазовая диаграмма для квазикристаллической структуры в ТЕ поляризации.

В литературе описываются два класса периодических фотонных структур: фотонные кристаллы, свойства которых определяются брэгговской дифракцией, и метаматериалы – композитные структуры, свойства которых не встречаются в природных материалах. Метаматериалы обладают уникальными оптическими и радиофизическими свойствами, позволяют менять подстраивать материальные параметры, а также могут иметь отрицательное преломление, предсказанное еще Веселаго [1]. В работах [2]-[4] изучался фотонный фазовый переход фотонный кристалл – метаматериал в периодических структурах. Точки фазового переходы были определены с помощью анализа зонных диаграмм. Так же было показано, что в метаматериальном режиме на верхней границе запрещенной зоны наблюдается типичная для метаматериала однородная мода, то есть фаза колебаний электромагнитного поля одинакова по всей структуре.

Поскольку квазикристаллы не обладают трансляционной симметрией, процедура построения зонных диаграмм не определена. Таким образом, режим метаматериала в данной работе определялся появлением однородной моды в структуре, которая является признаком режима метаматериала. В двумерном случае квазикристаллы удобнее всего описать с помощью мозаики Пенроуза [5], которая была разработана Роджером Пенроузом еще до обнаружения квазикристаллов. Как известно, мозаика Пенроуза образована двумя типами ромбов. Фактически это указывает на то, что квазикристалл, основанный на мозаике Пенроуза, образован двумя типами «элементарных ячеек», в отличие от обычного кристалла. Удобным способом получения такой структуры является метод проектирования, который был описан в работе [6].

В данной работе мы рассмотрели решетку на основе мозаики Пенроуза, состоящую из однородных диэлектрических цилиндров, с двумя переменными параметрами: диэлектрическая проницаемость цилиндров и коэффициент заполнения структуры, который определяется через нормированный радиус.

Мы построили структурный фактор для анализа частот брэгговской дифракции в структуре с решеткой Пенроуза с параметром сдвига $s = 0$ и сравнили со структурным фактором для треугольной и квадратной решеток. Полученные результаты показывают, что в периодической структуре дифракционные максимумы расположены на достаточном удалении друг от друга, в то время как в квазикристаллической структуре в том же масштабе наблюдается большое количество максимумов. Особенно важным является расстояние от точки $k = 0$ до ближайшего максимума, который определяет минимальную частоту брэгговской дифракции. Близкое расположение дифракционных пиков к точке $k = 0$ говорит о том, что метаматериал с квазикристаллической структурой не должен существовать.

Были исследованы спектры пропускания периодической и квазикристаллической структур. Мы построили зависимость минимума спектра пропускания от толщины ис-

следуемого образца. Оказалось, что в квазикристалле, как и в фотонном кристалле, затухание происходит по степенному закону, при этом в фотонном кристалле минимум коэффициента пропускания убывает быстрее с увеличением толщины образца, чем в квазикристалле. Полученные результаты говорят о том, что в квазикристалле транспортный режим такой же, как и в периодической структуре, поэтому в данном случае привычные выводы применимы.

Мы изучили распределения полей при падении гауссова пучка на квазикристаллические структуры квадратной формы. Результаты показывают, что в структуре наблюдается однородная мода, которая подтверждает переход квазикристаллической структуры в режим метаматериала. Следовательно, наличие низких частот брэгговских резонансов не обязательно приводит к тому, что в квазикристаллической структуре не может быть режима метаматериала. С увеличением параметра сдвига s однородная мода появляется при большем значении диэлектрической проницаемости. В структуре с параметром $s = 0.2$, $s = 0.5$ в режиме фотонного квазикристалла наблюдается промежуточное состояние с доменами, соответствующими противоположным фазам однородной моды.

Точки фазового перехода определялись по появлению однородной моды в структуре, состоящей из диэлектрических цилиндров, с решеткой на основе мозаики Пенроуза. Нами была построена фазовая диаграмма «квазикристалл – метаматериал» в осях $(\epsilon - r/d)$ для структуры с решеткой Пенроуза в ТЕ поляризации. В данном случае диапазон коэффициента заполнения структуры $r/d = 0.17 \div 0.50$. В отличие от периодических структур, которые описывались в работах [2], [3], минимум диэлектрической проницаемости в исследуемой структуре выше и равен 28.

Исследование поддержано РФФ №21-19-00677.

Список литературы

1. В.Г. Веселаго. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // УФН, Т. 92, с. 517-526, 1967.
2. M.V. Rybin et al. Phase diagram for the transition from photonic crystals to dielectric metamaterials // Nat. Comm., Т. 6, pp. 1-6, 2015.
3. E.E. Maslova et al. Dielectric metamaterials with electric response // Optics Lett., Т. 43, pp. 5516-5519, 2018.
4. E.E. Maslova et al. Transition between a photonic crystal and a metamaterial with electric response in dielectric structures // JETP Lett., Т. 109, pp. 340-344, 2019.
5. Penrose R. The role of aesthetics in pure and applied mathematical research // Bull. Inst. Math. Appl., т. 10, p. 266–271, 1974
6. M. Chodyn et al. Generalized Penrose tiling as a quasilattice for decagonal quasicrystal structure analysis // Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances, Т. 71, pp. 161-168, 2015.
7. O'Brian S., Pendry J.B., Photonic band-gap effects and magnetic activity in dielectric composites // J. Phys. Cond. Matt., Т. 14, p. 4035, 2002.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛЯРИТОННЫХ ВОЛНОВОДАХ НА ОСНОВЕ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

А. О. Михин^{1*}, Ф. А. Бенимецкий¹, А. В. Юлин¹, А. К. Самусев¹

¹Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
*E-mail: alexey.mikhin@metalab.ifmo.ru

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию поляритонной системы на основе двумерного прямозонного полупроводника – монослоя WSe₂, интегрированного с планарным волноводом. В ходе экспериментов по измерению зависимостей спектров пропускания фемтосекундных импульсов в поляритонной структуре продемонстрирован сильный нелинейный оптический отклик системы. Представленная нами теоретическая модель, описывающая распространение импульса в поляритонном волноводе с учётом взаимодействия с экситонным резервуаром, позволила качественно воспроизвести нелинейные процессы в исследуемой системе.

Одним из перспективных направлений современной оптоэлектроники является разработка миниатюрного фотонного чипа, способного обрабатывать информацию как квантовыми, так и сверхбыстрыми классическими оптическими методами. Ключом к решению этой проблемы могут быть устройства, в которых распространением света можно эффективно управлять с помощью оптического излучения малой интенсивности. Одним из способов достижения эффективного фотон-фотонного взаимодействия при малых интенсивностях возбуждения является использование сильной связи между экситонами и фотонами в полупроводниковых системах, что приводит к образованию составных квазичастиц — экситонных поляритонов. В подобных системах экситон-экситонное взаимодействие служит связующим звеном для эффективных межфотонных взаимодействий. В настоящее время активно исследуются поляритонные системы на основе двумерных материалов [1]. Благодаря тому, что экситоны в дихалькогенидах переходных металлов (ДПМ) обладают большой силой осциллятора и энергией связи [2], наблюдение режима сильной связи между экситонами и фотонными модами структур становится возможным не только при криогенных температурах, но и при комнатной температуре. Кроме того, оптический нелинейный отклик в поляритонных структурах на основе двумерных полупроводников имеет тот же порядок величины, что и в поляритонных структурах на основе III-IV полупроводников [3]. В представленной работе нами исследовался нелинейный оптический отклик в поляритонной системе на основе монослоя WSe₂ интегрированного с планарным волноводом.

Для создания поляритонного волновода мы использовали монослой WSe₂, полученный с помощью метода механического отшелушивания от объёмного кристалла, который был интегрирован с планарным неструктурированным волноводом Ta₂O₅ на подслое SiO₂. Для введения возбуждающего излучения в гибридную систему использовались решетчатые элементы ввода/вывода, которые были изготовлены в волноводном слое с использованием электронно-лучевой литографии с последующим реактивным ионным травлением. Перенос монослоя производился на область волновода между элементами ввода/вывода.

Для характеристики полученных образцов, а именно для проведения экспериментов по спектроскопии углового отражения и пропускания, а также фотолюминесценции гибридных структур, использовалась многофункциональная экспериментальная установка Фурье-спектроскопии. При проведении исследований нелинейного оптического отклика поляритонной системы в качестве источника излучения использовались фемтосекундная лазерная система с оптическим параметрическим усилителем с длительностью выходного импульса 130 фс. Экспериментальная установка интегрирована с гелиевым криостатом замкнутого цикла с микродоступом, что позволило исследовать нелинейные поляритонные эффекты при температуре 7 К.

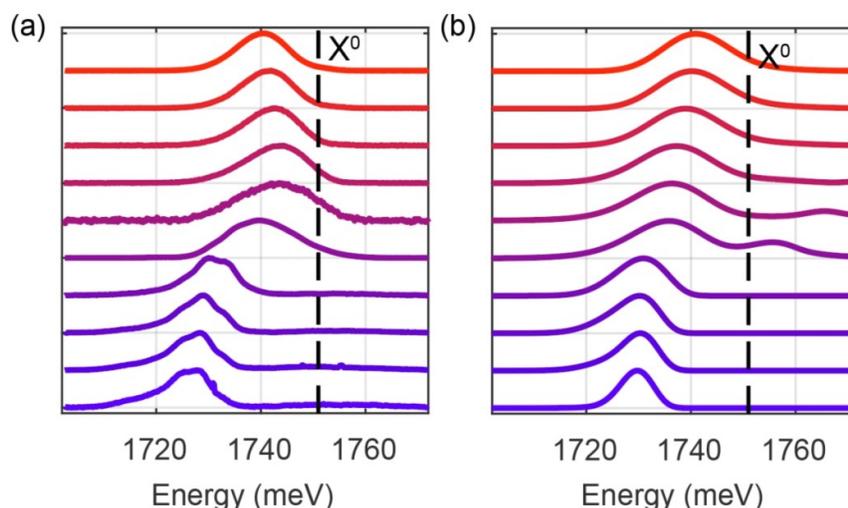


Рис. 1 (а) Экспериментальные и (b) полученные из численного моделирования спектры пропускания лазерных импульсов при увеличении энергии импульса (снизу вверх) для отстройки несущей частоты лазера от экситонного резонанса $\delta = -11$ мэВ. Спектры, показанные с вертикальным смещением, соответствуют изменению энергии импульса возбуждающего излучения (снизу вверх) от 11 пДж до 6896 пДж.

Для исследования нелинейно-оптических эффектов в поляритонном волноводе, проводились измерения спектров пропускания фемтосекундных лазерных импульсов при увеличении энергии импульса для отстройки несущей частоты лазера от экситонного резонанса $\delta = -11$ мэВ (Рис. 1а). С увеличением энергии импульса возбуждающего излучения наблюдается сдвиг спектра пропускания в область больших энергий, который вызван экситон-экситонным взаимодействием, а также насыщением поглощения с увеличением плотности возбуждаемых в системе экситонов. Дальнейшее увеличение энергии импульса приводит к сдвигу спектрального положения импульса в область меньших энергий. Такое поведение вызвано нелинейным взаимодействием распространяющегося в волноводе импульса с экситонным резервуаром в монослое ДПМ. Тщательный анализ полного набора измеренных данных позволил нам воспроизвести их с помощью численного моделирования (Рис. 1b). В пространственно-временной области используемая теоретическая модель показывает, что при определенных энергиях импульса поляритонная нелинейность позволяет компенсировать временное уширение импульса, что может служить признаком формирования солитонов в исследуемой системе.

Таким образом, нами была реализована поляритонная структура на основе монослоя WSe_2 интегрированного с планарным волноводом на основе Ta_2O_5 . Показано, что в такой системе наблюдается сильный нелинейный оптический отклик, для описания которого необходимо учитывать не только режим сильной связи, но и взаимодействие возбуждающего излучения с экситонным резервуаром.

Исследование поддержано РФФ № 22-22-00663.

Список литературы

1. Schneider, Christian, et al. Two-dimensional semiconductors in the regime of strong light-matter coupling // Nature communications 9.1 (2018): 1-9.
2. Wang, Gang, et al. Colloquium: Excitons in atomically thin transition metal dichalcogenides // Reviews of Modern Physics 90.2 (2018): 021001.
3. Kravtsov, Vasily, et al. Nonlinear polaritons in a monolayer semiconductor coupled to optical bound states in the continuum // Light: Science & Applications 9.1 (2020): 1-8.

СВЯЗАННОЕ СОСТОЯНИЕ В КОНТИНУУМЕ В ОДНОМЕРНОМ АНИЗОТРОПНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

С.В. Наболь^{1,2}, П.С. Панкин^{1,2}, Д.Н. Максимов^{1,2}, И.В. Тимофеев^{1,3}

¹Институт физики им Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск 660036, Россия

²Сибирский Федеральный университет, Красноярск 660041, Россия
st.nabol@gmail.com

Связанное состояние в континууме (ССК) – это неизлучающее собственное состояние открытой системы, чья собственная энергия лежит в непрерывном континууме распространяющихся волн [1]. Теоретически, ССК имеют бесконечную добротность, так как не излучают в окружающее пространство. Для возбуждения и детектирования ССК, необходимо связать ССК с распространяющимися волнами. Тогда ССК превращается в квази-ССК с конечной добротностью [2]. В настоящее время ССК находят множество применений в фотонике, в том числе в лазерных резонаторах, оптических сенсорах и светофильтрах [3],[4].

Исследуемая модель – это ФК структура из чередующихся изотропных и анизотропных слоев с двумя анизотропными дефектными слоями (Рис. 1). Рассматривается случай, когда у-поляризованный свет падает нормально на структуру. Анизотропный ФК прозрачен для у-волн и непрозрачен для х-волн, которые могут локализоваться в дефектных слоях. Путем поворота оптической оси дефектных слоев можно добиться деструктивной интерференции вытекающих из них волн. Получающееся при этом ССК – это ССК типа Фабри – Перо (ФП-ССК) [1]. Такой тип ССК реализуется когда два дефектных слоя эквивалентны двум идеально отражающим зеркалам, как в обычном резонаторе Фабри – Перо.

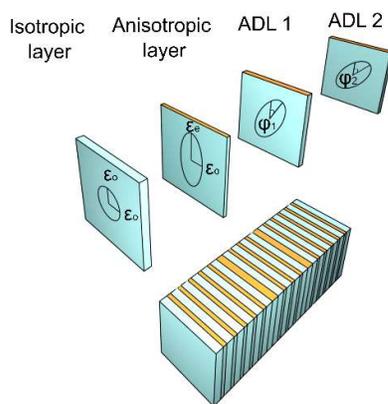


Рис. 1. Модель исследуемой структуры

На рис. 2 представлен спектр отражения структуры, рассчитанный с помощью метода Берремана, в зависимости от азимутального угла ϕ_1 поворота оптической оси первого дефектного слоя. Красная горизонтальная линия показывает положение дефектной моды, в случае, когда в структуре есть только один дефект, угол поворота которого зафиксирован. Другая красная линия показывает положение дефектной моды, в случае, когда в структуре есть только один дефект, угол поворота которого меняется. Видно, что резонансные линии в структуре с двумя дефектами испытывают квазипересечение – расталкивание резонансных линий при их прохождении друг через друга. Оно возникает из-за связи двух локализованных мод.

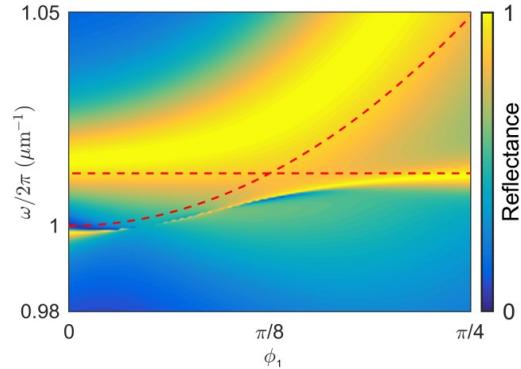


Рис. 2. Спектр отражения структуры для у-поляризованного света

Наличие связи также приводит к реализации ФП-ССК, которое проявляется спектрально в виде коллапса резонансной линии. ФП-ССК возникает из-за деструктивной интерференции вытекающих из дефектных слоев волн. Видно, что, приближаясь или отдаляясь от ССК, можно эффективно управлять шириной резонансной линии, т. е. добротностью резонансной моды. Полученные спектральные особенности могут быть объяснены в рамках временной теории связанных мод [5]. Из рисунка также видно, что высокочастотная резонансная линия уширяется, достигая максимальной ширины при определенном значении угла ϕ_1 . Такая мода называется суперизлучающей. В отличие от ССК, суперизлучающая мода возникает, когда выходящие из дефектных слоев волны интерферируют конструктивно.

В работе было найдено ССК типа Фабри – Перо в ФК структуре с чередующимися изотропными и анизотропными слоями, содержащей два анизотропных дефектных слоя. Полученные результаты могут быть полезны при создании оптических микрорезонаторов с управляемой добротностью.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-4012.2021.1.2).

Список литературы

1. C.W. Hsu, B Zhen, A.D. Stone, et al. Bound states in the continuum // *Nature Reviews Materials.*, vol. 1, pp. 1, 2016.
2. P. S. Pankin, D. N. Maksimov, K. P. Chen, et al. Fano feature induced by a bound state in the continuum via resonant state expansion // *Scientific reports.*, vol. 10, pp. 1, 2020.
3. S Joseph, S Pandey, S Sarkar, et al. Bound states in the continuum in resonant nanostructures: an overview of engineered materials for tailored applications // *Nanophotonics* vol. 10, pp. 4176. 2021.
4. S. I. Azzam, A.V. Kildishev. Photonic bound states in the continuum: from basics to applications // *Advanced Optical Materials.*, vol. 9, pp. 2001469, 2021.
5. S Fan, W Suh, J. D. Joannopoulos., Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators // *JOSA A.*, vol. 20, pp. 569, 2003.

НАПРАВЛЕННОЕ РАССЕЙЯНИЕ НА АСИММЕТРИЧНЫХ ДИМЕРАХ КРЕМНИЕВЫХ СФЕР

Д. В. Обыденнов^{1*}, Д. Н. Гулькин¹, В. И. Авилкин¹, Д. А. Шилкин¹, Е. В. Любин¹,
В. О. Бессонов¹, А.А.Федянин¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

*E-mail: obydenov@nanolab.phys.msu.ru

В работе исследуется рассеяние эванесцентных волн на асимметричных димерах сферических кремниевых частиц, которые могут быть изготовлены методом лазерно-индуцированного переноса. В результате численных расчётов показано, что такие наноантенны могут работать как демультимплексоры лазерного излучения, направляя свет с разными длинами волн в различных направлениях.

Кремниевые наноантенны позволяют управлять светом на субволновых масштабах, не испытывая при этом существенные омические потери, благодаря чему они находят многочисленные применения в оптике и нанофотонике [1,2]. Использование кремниевых наноантенн особенно перспективно в двумерной интегральной оптике. Во-первых, они позволяют обеспечить эффективную перекачку энергии между свободным пространством и компонентами фотонной интегральной схемы, будучи гораздо более компактными, чем классические системы заведения на основе дифракционных решёток [3,4]. Во-вторых, за счёт возбуждения резонансов Ми они могут работать как оптические демультимплексоры длин волн с относительно узким спектральным диапазоном переключения [5]. Так, было экспериментально показано, что асимметричные димеры кремниевых нанодисков рассеивают свет вдоль подложки в направлении, сильно зависящем от длины волны [6].

Важным параметром нанофотонных систем является возможность их масштабирования. На сегодняшний день для изготовления оптических наноантенн чаще всего используют многоступенчатый процесс на основе электронной литографии. Он позволяет изготавливать структуры цилиндрической формы с разрешением вплоть до нескольких нанометров, однако обладает рядом недостатков. В их числе — ограниченный выбор подложек, доступных для изготовления структур, а также сложность и дороговизна масштабирования. Одним из альтернативных методов изготовления кремниевых наноструктур является метод лазерно-индуцированного переноса, также известный как фемтосекундная лазерная печать [8]. Он позволяет создавать сферические частицы контролируемого размера на широком классе подложек [4]. Этот метод основан на использовании одиночных фемтосекундных лазерных импульсов, сфокусированных на плёнке донорного материала. Плёнка плавится вследствие поглощения импульса и формирует капли, которые направляются на приёмную подложку, где они кристаллизуются в частицы сферической формы.

В данной работе мы исследуем рассеяние эванесцентных волн на асимметричных димерах сферических кремниевых частиц, которые могут быть изготовлены методом лазерно-индуцированного переноса. Для рассмотрения был выбран случай димеров, состоящих из частиц диаметром 240 нм и 110 нм, и спектральный диапазон 550-770 нм. В указанном диапазоне сечение рассеяния плоской волны на большей частице на порядок выше, чем на меньшей, и значительной асимметрии направленности рассеяния не наблюдается. Однако в случае рассеяния эванесцентных волн, как показывают расчёты, наблюдение значительной асимметрии возможно.

Численный эксперимент проводился с помощью прямого решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области. Рассматривались димеры кремниевых сфер, лежащих на стеклянной подложке. Эванесцентная волна моделировалась как результат полного внутреннего отражения плоской волны от границы раздела подложки и воздуха. Результат расчёта для случая, при котором расстояние между

центрами частиц составляет 215 нм, показан на (рис. 1). Можно видеть, что для длин волн 600 и 720 нм наблюдается различное направление максимума рассеяния, при этом для коротких длин волн проявляется значительная асимметрия направленности рассеяния, не характерная для рассеяния одиночными частицами.

С учётом того, что такие димеры могут быть созданы с помощью фемтосекундной лазерной печати, представленные результаты могут найти применение в устройствах интегральной фотоники, где необходимо спектральное демультиплексирование световых потоков.

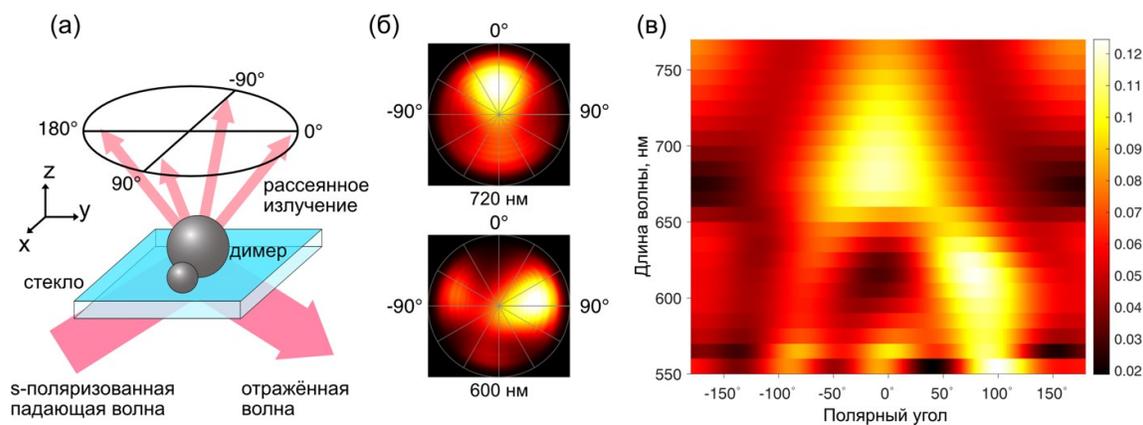


Рис. 1. (а) Схема численного эксперимента по рассеянию эванесцентной электромагнитной волны на димере кремниевых наносфер; (б) рассчитанная картина рассеяния в дальнем поле для длин волн падающего излучения 720 нм и 600 нм; (в) интегральное рассеяние в сектор шириной 20 градусов в зависимости от полярного угла и длины волны.

Исследование поддержано РФФИ № 20-02-00715. Д. В. Обыденнов является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (№ 21-2-2-45-1).

Список литературы

1. D. Bouchet, M. Mivelle, J. Proust, et.al. Enhancement and inhibition of spontaneous photon emission by resonant silicon nanoantennas // *Phys. Rev. Appl.*, vol. 6, p. 064016, 2016.
2. J. Li, N. Verellen, D. Vercruyse, et.al. All-dielectric antenna wavelength router with bidirectional scattering of visible light // *Nano Lett.*, vol. 16, pp. 4396–4403, 2016.
3. I. Sinev, F. Komissarenko, I. Iorsh, et.al. Steering of guided light with dielectric nanoantennas // *ACS Photonics*, vol. 7, pp. 680–686, 2020.
4. D.N. Gulkin, A.A. Popkova, B.I. Afinogenov, et.al. Mie-driven directional nanocoupler for Bloch surface wave photonic platform // *Nanophotonics*, vol. 10, pp. 2939–2947, 2021.
5. P. Albella, T. Shibanuma, and S.A. Maier, Switchable directional scattering of electromagnetic radiation with subwavelength asymmetric silicon dimers // *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 18322, 2015.
6. T. Shibanuma, T. Matsui, T. Roschuk, et.al. Experimental demonstration of tunable directional scattering of visible light from all-dielectric asymmetric dimers // *ACS Photonics*, vol. 4, pp. 489–494, 2017.
7. I. Staude, J. Schilling, Metamaterial-inspired silicon nanophotonics // *Nat. Photonics*, vol. 11, pp. 274–284, 2017.
8. U. Zywiets, A.B. Evlyukhin, C. Reinhardt, and B.N. Chichkov, Laser printing of silicon nanoparticles with resonant optical electric and magnetic responses // *Nat. Commun.*, vol. 5, p. 3402, 2014.

НАБЛЮДЕНИЕ И НЕЛИНЕЙНОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ ЗОН В ВЫСОКОДОБРОТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ

К.И. Охлопков^{*1}, И.М. Антропов¹, А.А. Назаренко¹, М.Р. Щербаков², В.О. Бессонов¹,
А.Н. Рубцов¹, Г. Швеиц³, А.А. Федянин¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

²Калифорнийский университет, США

³Корнеллский университет, США

*E-mail: okhlopkov@nanolab.phys.msu.ru

В данной работе были исследованы плоские зоны в кремниевых метаповерхностях, обладающих резонансами высокой добротности. С помощью плоских зон было продемонстрировано усиление генерации третьей оптической гармоники в таких структурах.

В последние годы в фотонике активно исследуются метаповерхности, двумерные массивы наночастиц, которые позволяют управлять на наномасштабе такими характеристиками света как поляризация, фаза, амплитуда [1]. Помимо этого, метаповерхности интересны с точки зрения создания нелинейных устройств и генерации второй и третьей оптической гармоники (ТГ), в частности [2]. Для усиления взаимодействия света с веществом дизайн структур часто подбирают таким образом, чтобы метаповерхность обладала резонансами высокой добротности. Однако, кривизна дисперсии таких резонансов не позволяет эффективно накачивать среду в широком диапазоне углов. В данном исследовании была реализована метаповерхность с резонансом с нулевой дисперсией (с плоской зоной) в определённом диапазоне углов падающего излучения и было продемонстрировано усиление генерации ТГ при накачке, спектрально совпадающей с этой зоной, по сравнению с накачкой резонанса с ненулевой дисперсией.

Исследуемые метаповерхности представляют собой двумерные квадратные решётки из кремниевых параллелепипедов на стекле высотой 100 нм и одинаковыми периодами вдоль и поперёк параллелепипедов. Было продемонстрировано, что, изменяя длину, ширину и период параллелепипедов, можно реализовать плоскую зону в диапазоне падающих углов от -10° до $+10^\circ$ на разных длинах волн в диапазоне 1000–1100 нм. Для экспериментального подтверждения усиления взаимодействия света со структурой, имеющей плоскую зону, была проведена спектроскопия третьей гармоники данных метаповерхностей. Используя две числовые апертуры, 0.112 и 0.059, соответствующие диапазонам углов от -6.4° до $+6.4^\circ$ и от -3.4° до $+3.4^\circ$, было показано, что за счёт лучшей связи волновых векторов близких к -6.4° и $+6.4^\circ$, для структуры с плоской зоной контраст ТГ при накачке с апертурой 0.112 к накачке с апертурой 0.059 растёт в 5 раз по сравнению с контрастом ТГ от метаповерхности с ненулевой кривизной зоны.

Список литературы

1. N. Yu, P. Genevet, M.A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, Z. Gaburro, Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction // Science, vol. 334, pp. 333–337, 2014.

2. Y. Yang, W. Wang, A. Boulesbaa, I.I. Kravchenko, D.P. Briggs, A. Poretzky, D. Geohegan, J. Valentine, Nonlinear Fano-resonant dielectric metasurfaces // Nano Lett., vol. 15, pp. 7388–7393, 2015.

КРУГОВОЙ ДИХРОИЗМ МЕТАПОВЕРХНОСТИ, ПОКРЫТОЙ СЛОЕМ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

П. С. Панкин^{1,2*}, Д. Н. Максимов^{1,2}, К.-П. Чэнь³, И. В. Тимофеев^{1,2}

¹Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50/36

²Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 28

³Национальный университет Ян-Мин-Чжоу-Тун
71150, Тайвань, Тайнань, район Гуирен, Гаофа 3-я улица, д. 301

*E-mail: pavel-s-pankin@iph.krasn.ru

На основе временной теории связанных мод построена теоретическая модель, описывающая явление кругового дихроизма в диэлектрической метаповерхности, обладающей резонансным отражением, покрытой сверху слоем планарно-ориентированного нематического жидкого кристалла.

Рассматриваемая структура представляет собою метаповерхность, состоящую из нанокирпичей, выполненных из нитрида кремния и помещенных на кварцевой подложке [1]. Элементарная ячейка метаповерхности представляет собою два нанокирпича, отличающиеся геометрическими размерами. Метаповерхность обладает резонансным отражением, обусловленным возбуждением квази-связанного состояния в континууме [2]. Сверху на метаповерхность нанесен слой планарно-ориентированного жидкого кристалла, оптическая ось которого образует угол ϕ с осью симметрии элементарной ячейки. На основе временной теории связанных мод была построена модель, описывающая резонансное отражение системы, обладающей круговым дихроизмом $CD = R_r - R_l$, где R_r и R_l – отражение соответственно в правую и левую круговые поляризации [3]. Величина и знак кругового дихроизма зависят от толщины L слоя жидкого кристалла и угла ϕ (рис. 1).

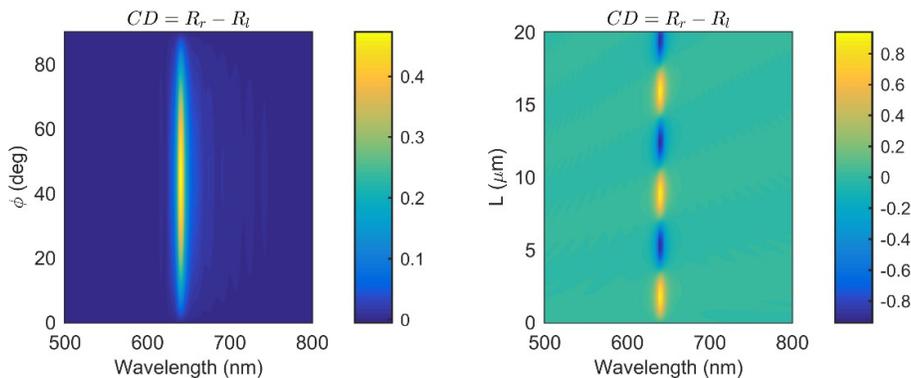


Рис. 1. (слева) CD в зависимости от угла поворота оптической оси жидкого кристалла ϕ , при $L = 10$ мкм; (справа) CD в зависимости от толщины L слоя жидкого кристалла, при $\phi = 45^\circ$

Исследование было поддержано Российским научным фондом (проект № 22-42-08003).

Список литературы

1. J. H. Yang, Z. T. Huang, D. N. Maksimov et.al. Low-Threshold Bound State in the Continuum Lasers in Hybrid Lattice Resonance Metasurfaces // Laser & Photonics Reviews vol. 15(10), p. 2100118, 2021.
2. A.F. Sadreev Interference traps waves in an open system: bound states in the continuum // Rep. Prog. Phys, vol. 84, p. 055901, 2021.
3. M.V. Gorkunov, A.A. Antonov, Y.S. Kivshar Metasurfaces with maximum chirality empowered by bound states in the continuum // Physical Review Letters, vol 125(9), p. 093903, 2020.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ФОТОННЫХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

А. В. Писаренко^{1*}, Д. А. Колымагин¹, Д.А. Чубич¹, А. И. Проходцов^{3,4}, R. P. Matital¹,
В.В. Ковалюк³, А.Г. Витухновский^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, Российская Федерация, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

*E-mail: mipt.3D@gmail.com

²Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН
119991, Москва, Ленинский пр-т., 53

³Московский педагогический государственный университет
119435, Москва, Малая Пироговская ул., 1/1

⁴Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"
101000, Москва, Мясницкая ул., 20

Изготовление компонентов фотонных интегральных схем – важная научно-исследовательская задача, имеющая большое прикладное значение для развития цифровых технологий. В данной работе проведено изготовление межсоединений (микроволноводов) для фотонных интегральных схем методом двухфотонной лазерной литографии и дальнейшее исследование их морфологии и пропускания. Пропускание исследовано для межсоединений различной геометрии, подобраны оптимальные параметры, позволяющие достичь характеристики пропускания света менее 5 дБ на длине волны 1550 нм.

В настоящее время, развитие цифровых технологий требует перехода на масштабируемую интегральную оптическую платформу, которая позволит существенно улучшить характеристики высокопроизводительных систем передачи и обработки больших объемов данных. В частности, ведутся работы по созданию гибридных фотонных интегральных схем сложной архитектуры. Предложенная в данной работе технология двухфотонной лазерной литографии для создания 3D оптических межсоединений (микроволноводов) для фотонных интегральных схем дает принципиальные преимущества по сравнению с традиционными 2D, в частности, позволяет строить сложные трехмерные плотноупакованные оптические схемы на фотонном чипе.

Метод двухфотонной лазерной литографии основан на инициации реакции фотополимеризации, вызванной эффектом двухфотонного поглощения, в пределах фокального пятна фемтосекундного лазерного излучения. Объемный элемент литографии для данного метода связан с дифракционным пределом Аббе и достигает субмикронных размеров (до 200 нм). В результате движения фокального пятна лазерного излучения относительно подложки во всех трех направлениях, данная технология позволяет создавать произвольные полимерные структуры сложной топологии с субмикронным разрешением [1-4].

Данная работа посвящена изготовлению фотонных межсоединений (волноводов) методом двухфотонной лазерной литографии для дальнейшего применения в фотонных интегральных схемах. В рамках данной работы изготовлены как одиночные фотонные межсоединения так и массивы таких межсоединений в 3D пространстве. Изготовленные структуры исследованы методом оптической, атомно-силовой и электронной микроскопии (рис. 1). Также в ходе работы исследована зависимость пропускания таких волноводов в зависимости от их формы. Найдены оптимальные параметры, с использованием которых продемонстрировано пропускание света менее 5 дБ на длине волны 1550 нм. Для дальнейшего улучшения характеристик пропускания межсоединений предложен метод (3 + 1)D литографии, который позволяет создавать core-shell структуры.

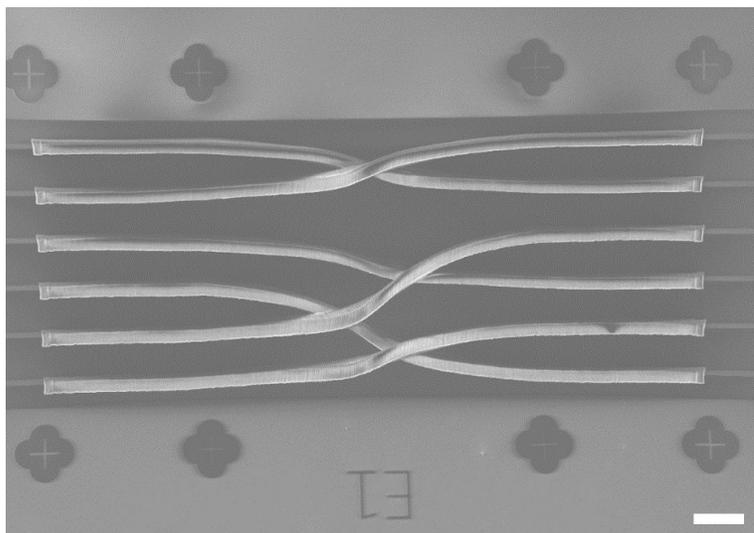


Рис. 1. Изготовленные межсоединения (микроволноводы). Изображение электронного микроскопа. Масштабная метка 10 мкм.

Исследования были выполнены при поддержке гранта РФФ №22-79-10153.

Список литературы

1. Wang H. et al. Toward near-perfect diffractive optical elements via nanoscale 3D printing //ACS nano. – 2020. – Т. 14. – №. 8. – С. 10452-10461.
2. Pisarenko A. V. et al. DLW-printed optical fiber micro-connector kit for effective light coupling in optical prototyping //Optik. – 2020. – Т. 201. – С. 163350.
3. Matital R. P. et al. Luminescence confocal microscopy of 3D components of photonic integrated circuits fabricated by two-photon photopolymerization //Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2022. – Т. 7. – №. 2. – С. 100413.
4. Safronov K. R. et al. Miniature Otto Prism Coupler for Integrated Photonics //Laser & Photonics Reviews. – 2022. – Т. 16. – №. 4. – С. 2100542.

ВОЗБУЖДЕНИЕ БЛОХОВСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

А. А. Попкова^{1*}, К. Р. Сафронов¹, Д. И. Маркина², А. П. Пушкарев²,
С. В. Макаров², В. О. Бессонов¹, А. А. Федянин¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

²Физико-технический факультет Университета ИТМО
197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9

*E-mail: popkova@nanolab.phys.msu.ru

Галогенидные перовскитные материалы являются новой платформой для эффективной генерации когерентного излучения во всем видимом диапазоне. В данной работе мы показываем возможность возбуждения блоховских поверхностных волн при помощи перовскитных нано- и микроструктур с эффективностью более 16%. Кроме того, мы демонстрируем выраженный эффект управления лучом генерируемого лазерного излучения при помощи изменения положения луча накачки, что обеспечивает дополнительную степень свободы для управления светом в плоскости структуры.

В последние годы активное развитие получила оптика перовскитных материалов. Благодаря низкому порогу генерации когерентного излучения, высокому квантовому выходу, возможности перестройки в широком спектральном диапазоне и наличию легких и эффективных методов изготовления галогенидные перовскитные стали новой платформой для создания ультракомпактных микро- и нанолазеров [1, 2]. Однако вывод лазерного излучения из микрокристаллов перовскита сталкивается с рядом проблем, связанных с большим углом расхождения, поглощением света подложкой и высокими потерями в случае интеграции с волноводами.

В данной работе мы демонстрируем интеграцию галогенидных перовскитных нано- и микролазеров с платформой на основе одномерного фотонного кристалла (ФК), поддерживающего эффективное возбуждение и длительное распространение блоховских поверхностных волн (БПВ) в видимой спектральной области. Интеграция перовскитных лазеров с ФК не влияет на порог лазерной генерации, но обеспечивает перекачку когерентного излучения в БПВ. Излучение, выходящее из перовскитной проволоки через две субволновые грани, образует двумерную интерференционную картину, приводящую к возбуждению БПВ в направлениях, определяемых длиной нанопроволоки и эффективным показателем преломления БПВ. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с численными расчетами, проведенными методом конечных разностей во временной области (FDTD), которые демонстрируют эффективность возбуждения БПВ более 16%. В отличие от перовскитового нанолазера с субволновыми размерами, перовскитовые микролазеры со сторонами, намного превышающими излучаемую длину волны, поддерживают высоконаправленное возбуждение БПВ, распространяющихся на расстояние до 50 мкм. Изотропный закон дисперсии БПВ в плоскости образца также позволяет смещать и направлять луч путем настройки положения луча накачки на микролазере.

Исследование поддержано Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС» № 19-2-6-28-1.

Список литературы

1. H. Zhu, Y. Fu, F. Meng, et al. Lead halide perovskite nanowire lasers with low lasing thresholds and high quality factors // Nat. Mater., vol. 14(6), pp. 636-642, 2015.
2. A. P. Pushkarev, V. I. Korolev, D. I. Markina, et al. A few-minute synthesis of CsPbBr₃ nanolasers with a high quality factor by spraying at ambient conditions // ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 11(1), pp. 1040-1048, 2018.

ТАММОВСКИЕ ПЛАЗМОНЫ В ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ, ПОЛУЧЕННЫХ АНОДИРОВАНИЕМ ТИТАНА

М.В. Пятнов^{1,2*}, Р.Г. Бикбаев^{1,2}, И.В. Тимофеев^{1,2}, С.Я. Ветров^{1,2}

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/38*

²*Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 28*

*E-mail: MaksPyatnov@yandex.ru

Исследованы таммовские плазмоны в фотонных кристаллах, полученных методом анодирования алюминия.

В последнее время большую популярность приобрел метод анодирования металлической фольги с целью получения наноструктур. При периодическом варьировании во времени режима протекания тока или напряжения, поры, возникающие в оксиде металла, становятся модулированными, структура становится периодической и возникают фотонные запрещённые зоны, т. е. свет определённых длин волн не может распространяться сквозь такую структуру. Преимуществом данного метода является высокая контролируемость характеристик получаемого образца при помощи настройки режима анодирования. Традиционным материалом, используемым для получения таких фотонных кристаллов, является алюминий, что связано с простотой технологического процесса [1]. Другим многообещающим материалом для выращивания фотоннокристаллических структур является титан, что связано с его потенциальными фотокаталитическими применениями в том числе для получения чистого водорода путём расщепления воды [2].

В рамках данной работы мы изучили свойства структуры, состоящей из TiO_2 фотонного кристалла и тонкой плёнки плазмонного материала, нанесённой на него. Методом FDTD был произведён расчёт спектральных свойств такой структуры. Было показано, что в такой структуре возникнет таммовский плазмон-поляритон, частота возбуждения которого зависит от геометрических параметров кристалла. Исследованная структура может послужить в качестве фотокаталитической конструкции для производства «чистого» водорода [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 22-22-20078, <https://rscf.ru/project/22-22-20078/>

Список литературы

1. C. Law et al. // *Nanomaterials* 2018, vol. 8, p. 788.
2. A. Fujishima et al. // *Nature* 1972, vol. 238, p. 37.
3. M. Pyatnov et al. // *Nanomaterials* 2022. vol. 12. p. 928.

СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ В МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ОПТИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ

Г.А. Романенко^{1,2*}, П.С. Панкин^{1,3}, Д.С. Бузин^{1,3}, А.И. Краснов^{1,3}, В.С. Сутормин^{1,3},
С.В. Наболь^{1,3}, И.А. Тамбасов¹, Ф.В. Зеленев^{4,2}, А.Н. Масюгин^{4,2}, М.Н. Волочаев¹,
И.В. Тимофеев^{1,3}

¹Институт физики им Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, д. 50/38
*E-mail: gavriil21romanenko@mail.ru

²Сибирский университет науки и технологии им. Решетнёва
660037, Российская Федерация, Красноярск, ул. Крас. Рабочий, д. 31/7

³Сибирский Федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 28

⁴АО «НПП «Радиосвязь», 660021, Российская Федерация, Красноярск, ул. Декабристов, д.19/2

В работе представлены результаты численного расчета спектров металл-диэлектрического микрорезонатора. Микрорезонатор состоит из фотоннокристаллического (ФК) зеркала, металлического зеркала и слоя жидкого кристалла (ЖК) между ними. Установлено, что система при нагревании ЖК поддерживает связанные состояния в континууме (ССК) типа Фридриха – Винтгена. Показана возможность управления добротностью и положением резонансных мод посредством изменения параметров системы или приложения внешнего электрического поля к ЖК-слою.

Связанное состояние в континууме (ССК) – это безызлучательное, бесконечно добротное состояние открытой системы. ССК реализуется, когда локализованная внутри резонатора мода не связана с излучающими волнами, распространяющимися в волноводах. На основе систем с одномерными фотонными кристаллами (ФК) ранее были предложены микрорезонаторы, поддерживающие ССК, защищенные симметрией и ССК типа Фридриха – Винтгена [1].

Так как ССК по определению не связано с окружением, то для возбуждения и детектирования локализованной моды, необходимо связать её с распространяющимися волнами. Путем изменения коэффициента связи локализованной моды с континуумом распространяющихся волн, можно управлять добротностью квази-ССК. Так как в реальных системах существует поглощение, то ССК в них не будут бесконечно добротными, так как их добротность ограничена материальными потерями. ССК и квази-ССК были предложены для создания лазеров, светодиодов, солнечных элементов [2], а также для приложений магнитофотоники [3].

В настоящей работе рассмотрено ССК, локализованное в слое жидкого кристалла (ЖК), расположенного между двумя зеркалами – одномерным ФК и металлическим слоем (рис. 1).

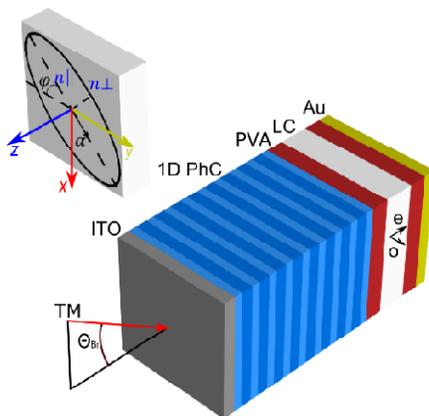


Рис. 1. Схема оптического микрорезонатора

ФК зеркало состоит из периодически расположенных слоёв Si_3N_4 и SiO_2 , первым и замыкающим слоем которого является высокопреломляющий слой Si_3N_4 . Перед ФК зеркалом расположен слой прозрачного оксида ИТО, проводящий электрический ток. Анизотропный слой представляет собой нематический ЖК 5ЦБ. Показатель преломления ЖК зависит от ориентации директора и изменяется в некоторых пределах. Вектор \mathbf{a} показывает направление оптической оси (ОО) ЖК. При повороте ОО, эффективный показатель преломления ЖК изменяется, благодаря чему изменяются спектральные характеристики микрорезонатора. Чтобы задать необходимую ориентацию директора, между ФК зеркалом и слоем ЖК располагается слой поливинилового спирта (ПВС). Заключительный слой микрорезонатора – это полупрозрачное золотое зеркало, внутренняя поверхность которого также покрыта ПВС.

Численным методом Берремана рассчитаны спектры микрорезонатора для ТМ-поляризованного света, падающего под углом Брюстера, при изменении температуры от 22°C до 37°C. На рис. 2 представлен спектр пропускания, при изменении температуры ЖК, для угла поворота ОО ЖК относительно плоскости падения света $\phi = \pi/4$. На рис. 2 наблюдается коллапсы резонансных линий, при температуре ЖК: 30,4 °C, 31,5 °C, 32,5 и т. д. (отмечены зелеными кружками), свидетельствующие о наличии ССК типа Фридриха – Винтгена. ССК данного типа возникают, как и при изменении угла поворота ОО ЖК, за счет деструктивной интерференции необыкновенной и обыкновенной волн, когда x компоненты электрического поля для о-волны и е-волны на выходе из ЖК в сумме дают нуль: $E_{ox} + E_{ex} = 0$, а сумма y компонент не равна нулю $E_{oy} + E_{ey} \neq 0$. При температуре, большей температуры плавления ЖК, реализуются ССК, так как анизотропный ЖК переходит в изотропное состояние, и связь между ТЕ-модой и ТМ-волной исчезает.

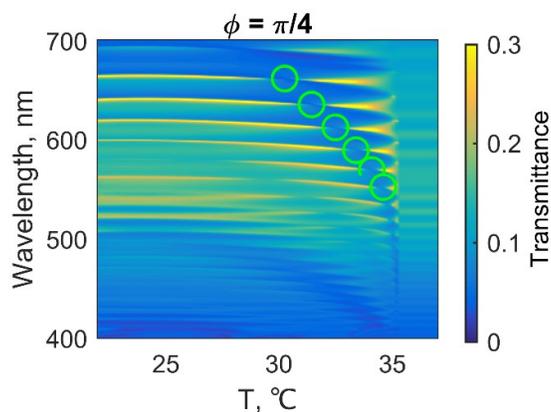


Рис. 2. Спектр пропускания микрорезонатора при изменении температуры от 22 до 37 °C под углом Брюстера при $\phi = \frac{\pi}{4}$

Исследование было поддержано Российским научным фондом (проект № 22-42-08003).

Список литературы

1. P.S. Pankin, B-R Wu, J-H Yang, K-P Chen, I.V. Timofeev, A.F. Sadreev One-dimensional photonic bound states in the continuum // *Commun*, vol. 3(91), 2020.
2. S. Joseph, J. Joseph, S. Pandey, S. Sarkar Bound states in the continuum in resonant nanostructures: an overview of engineered materials for tailored applications // *Nanophotonics*, vol. 10(17), pp. 4175-4207, 2021.
3. D.O. Ignatyeva, V.I. Belotelov Bound states in the continuum enable modulation of light intensity in the Faraday configuration // *Optics Letters*, vol. 45(23), pp. 6422-6425, 2020.

УПРАВЛЕНИЕ ДОБРОТНОСТЬЮ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ХИРАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ТАММОВСКОГО СОСТОЯНИЯ

С.Д. Корнев², Н.В. Рудакова^{1,2*}, И.В. Тимофеев^{1,2}, Р.Г. Бикбаев^{1,2}, С.Я. Ветров²

¹ *Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38*

*E-mail: Natalya-V-Rudakova@iph.krasn.ru

² *Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 28*

Оптическое таммовское состояние (ОТС) – это высокодобротное локализованное состояние света на границе двух материалов, которое является аналогом таммовскому состоянию электронов на границе полупроводника [1]. При добавлении в структуру хирального материала, например, холестерического жидкого кристалла (ХЖК), состояние будет называться хиральным оптическим таммовским состоянием (ХОТС) [2]. Усиление и управление добротностью данного состояния становится актуальной задачей в фотонике на сегодня.

На границе раздела между холестериком и сохраняющим поляризацию анизотропным зеркалом (СПАЗ) [3], возникает ХОТС [4]. Холестерический жидкий кристалл – оптическая хиральная среда, обладающая непрерывной винтовой симметрией тензора диэлектрической проницаемости. Для ХЖК даны следующие параметры: шаг холестерика составляет $p = 0.46$ мкм, $L = 4$ мкм – общая толщина слоя ХЖК, показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей $n_{\parallel} = n_o^c = \sqrt{\varepsilon_{\parallel}^c} = \sqrt{\varepsilon_o^c} = 1.45$ и $n_{\perp} = n_e^c = \sqrt{\varepsilon_{\perp}^c} = \sqrt{\varepsilon_e^c} = 1.75$.

Многослойное СПАЗ представляет собой структуру, состоящую из чередующихся идентичных одноосных диэлектрических слоев с различными показателями преломления обыкновенного n_o^p и необыкновенного n_e^p лучей, $\bar{\varepsilon}^p = (\varepsilon_o^p + \varepsilon_e^p)/2$ – среднее арифметическое диэлектрических проницаемостей. Элементарная ячейка структуры состоит из пары слоев, оптические оси которых расположены ортогонально друг другу: вертикально и горизонтально (V-H). Число слоев СПАЗ равно N^p , период структуры $2a$, где a – толщина одного слоя. Для определенности положим $a = 117$ нм; $n_o^p = \sqrt{\varepsilon_o^p} = 1.45$ и $n_e^p = \sqrt{\varepsilon_e^p} = 1.75$, длина оптического пути составляет $D = aN^p(n_e^p + n_o^p)$. Если СПАЗ содержит $N^p = 30$ слоев, то численные исследования спектра отражения с помощью прямого расчета методом матрицы переноса Берремана показывают, что добротность полученного состояния составляет $Q \approx 1500$.

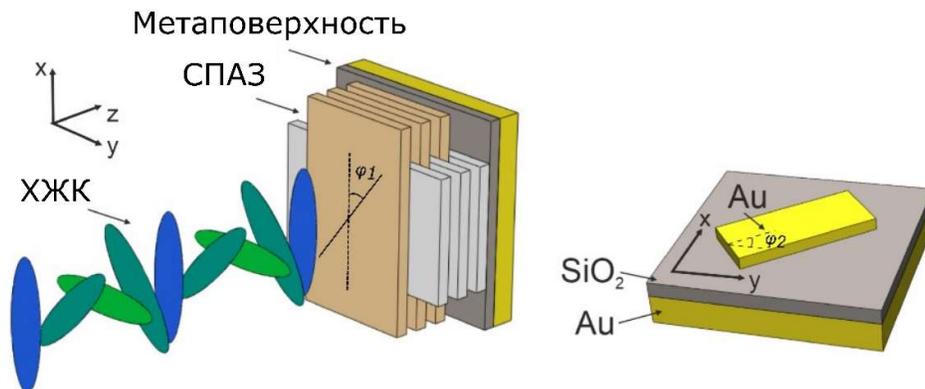


Рис. 1. Модель гибридной структуры для получения высокодобротного ХОТС состоящая из холестерика, СПАЗ и метаповерхности и схематичное изображение метаповерхности

Однако структура с таким большим количеством слоев трудно реализуема, поэтому для практического применения необходимо число слоев уменьшать. Для сохранения добротности хирального оптического таммовского состояния и максимального уменьшения габаритов структуры, кроме уменьшения числа слоев многослойного сохраняющего поляризацию зеркала, в структуру можно добавить метаповерхность (рис. 1). Метаповерхность [5] состоит из массива прямоугольных золотых нанокирпичей, расположенных на 100-нанометровом слое диоксида кремния SiO_2 , нанесенного на отражающую золотую пластинку толщиной 200 нм. Нанокирпичи имеют размеры: длина 190 нм, ширина 70 нм, толщина 70 нм и повернуты на угол 45° относительно оси.

В этом случае можно увидеть, что добротность структуры, состоящей из холестерика и 20 слоев сохраняющего поляризацию зеркала остается сравнимой с резонансной добротностью гибридной структуры, содержащей холестерик, 8 слоев сохраняющего поляризацию зеркала и такой метаповерхности (кружочки с крестиками на рис. 2). Важно отметить, что для диэлектрического СПАЗ с числом слоев менее 12 хиральное оптическое таммовское состояние не имеет спектрального разрешения. Однако, присоединенная к структуре метаповерхность позволяет получить локализованное состояние даже при меньшем количестве слоев сохраняющего поляризацию зеркала. Таким образом, если исключить СПАЗ из гибридной структуры (холестерик просто будет сопряжен с метаповерхностью), то есть $N^p = 0$, то получаем добротность ХОТС $Q \approx 26$, как экспериментально продемонстрировано в статье [5].

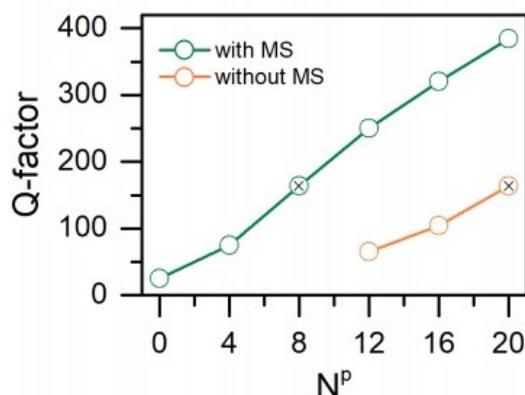


Рис. 2. Зависимость добротности ХОТС от числа периодов СПАЗ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-42-08003.

Список литературы

1. M.A. Kaliteevski et al. Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror // *Phys. Rev. B.*, vol. 76, p. 165415, 2007.
2. И.В. Тимофеев, С.Я. Ветров. Хиральные оптические таммовские состояния на границе среды с винтовой симметрией тензора диэлектрической проницаемости // *Письма в ЖЭТФ*, вып. 6, С. 393–397, 2016.
3. N.V. Rudakova et al. Chiral Optical Tamm States at the Interface between a Cholesteric and an All-Dielectric Polarization-Preserving Anisotropic Mirror // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, vol. 81, p. 10, 2017.
4. N.V. Rudakova et al. Chiral Optical Tamm States at the Interface between an All-Dielectric Polarization-Preserving Anisotropic Mirror and a Cholesteric Liquid Crystal // *Crystals*, 9(10), p. 502, 2019.
5. M.-Y. Lin et al. Chiral-Selective Tamm Plasmon Polaritons // *Materials*, 14, p. 2788, 2021.

INFLUENCE OF STRUCTURAL DISORDER ON BOUND STATES IN THE CONTINUUM IN PERIODIC BILAYER ARRAY OF DIELECTRIC RODS

E. E. Maslova¹, M. V. Rybin^{1,2}, A. A. Bogdanov^{1,2}, Z.F. Sadrieva^{1*}

¹*School of Physics and Engineering, ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: z.sadrieva@metalab.ifmo.ru

²*Ioffe Institute, 194021, St. Petersburg, Russia*

We study the influence of structural disorder on symmetry-protected and accidental bound states in the continuum supported by a two-layered periodic array of dielectric rods. We analyse robustness of bound states in the continuum against various types of structural disorder, spatial field localization. The results might be useful guidelines for practical implementation of bound states in the continuum.

Dielectric resonators are open systems whose eigenmodes couple to the radiation continuum resulting in nonzero radiation losses. For a long time, it was believed that only guided modes with frequencies below the light line were decoupled from the radiation continuum [1]. In the early 2000's, several counterexamples of perfectly localized states, i.e. totally decoupled from the radiation continuum, at frequencies above the light line were proposed in dielectric gratings and photonic crystal waveguides [2]. Such states are known as *bound states in the continuum (BIC)*. Being a general wave phenomenon, bound states in the continuum (BICs) appear in acoustic, hydrodynamic, and photonic systems of various dimensionalities.

In this work, we provide a rigorous analysis of frequency and quality factor of symmetry-protected and accidental BICs supported by an periodic bilayer array composed of infinitely long dielectric rods accounting for a structural disorder of position of rods' centers, see Fig. 1(a). Distance between layers along the y -axis is $h = 4.7$ cm, period along the x -axis equals to $a = 3$ cm, radius $r = 0.5$ cm, and dielectric permittivity $\chi = 2.1$. If there are only two sources of losses, the inverse total Q factor is given by a sum two terms one of whose corresponds to losses in finite and ordered structure, and another is a contribution from structural disorder

$$1/Q_{ord} + 1/Q_{dis} = 1/Q_{tot}.$$

It was shown that a genuine BIC transforms into a resonant state (quasi-BIC) with a finite Q factor which value depends on the size of the structure. Namely, Q factor of symmetry-protected BICs grows as N^2 , while for accidental BICs from the origin of Brillouin zone $Q \sim N^3$ [3,4]. Using the finite elements method, we calculated the eigenmode spectrum of a finite structure composed of $N = 100$ number of periods with structural disorder. The disorder is introduced by randomly fluctuation of the centers' coordinates along the x -axis, along the y -axis and along both axes simultaneously that is calculated using the formula $\Delta t = R a \Delta$, where $\Delta = [0;0.1]$ is a disorder parameter and R is a random value varying from -1 to 1. For all three types of disorder and value of disorder amplitude Δ , we simulated a hundred ensembles to collect statistical data. Figure 2 shows total Q factor of symmetry-protected and in- Γ accidental BICs in the case of x -axis structural disorder. Both curves start from the value of Q_{ord} and exhibit decreasing with Δ growing. The accidental BICs are more sensitive to the fluctuations in rod positions along the y axis rather than along the x axis. It can be explained by the fact that the in- Γ accidental BICs require particular values of the distance between layers h at whose the round-trip phase shift accumulates to a value being multiple of 2Δ [5]. In contrast, symmetry-protected BICs exist at any distance h , hence they are less sensitive to the fluctuation of x coordinate, rather than y coordinate since it destroys periodicity.

Next, we investigate the correlation between disorder along x and y directions, i.e. whether a sum of the individual contributions gives a total losses for x,y -disorder. We observed that for accidental BIC the summation rule breaks down at $\Delta > 0.05$, while for symmetry-protected it is valid even for larger Δ . First, there is some correlation between shifts along x and y appearing since the shape of a sole rod is conserved. Second, the structural disorder causes the spatial mode localization and, therefore, reduces the effective length of the structure limiting the Q factor.

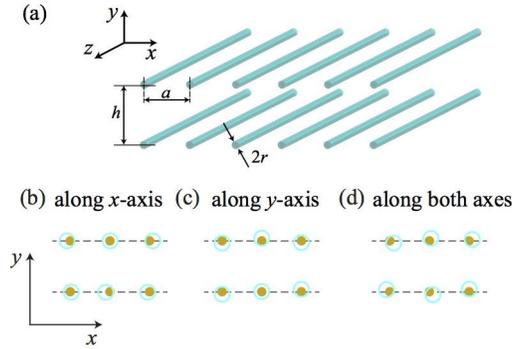


Fig. 1. (a) Schematic view of the structure under consideration. (b-d) Illustrations of structural disorder in the structure.

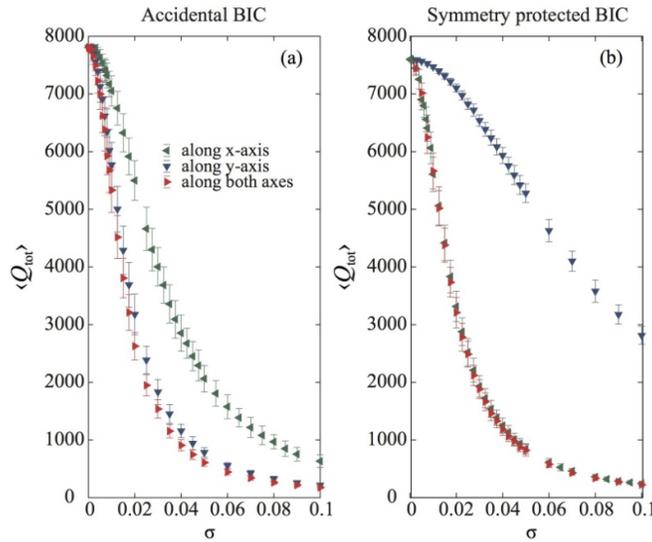


Fig. 2. Total Q factor versus amplitude of the structural disorder. Bars indicate the standard deviation.

The work is supported by the Russian Science Foundation (18-72-10140).

References

1. Photonic crystals. Molding the flow of light. / J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, J.N. Winn. New York: Princeton University Press Princeton, 2nd ed., 1995.
2. C.W. Hsu, B. Zhen, A.D. Stone, et al. Bound states in the continuum // Nature Reviews Materials, vol. 1 (9), pp. 1-13, 2016.
3. E.N. Bulgakov, D.N. Maksimov. Light enhancement by quasi-bound states in the continuum in dielectric arrays // Optics Express, vol. 25, pp. 14134, 2017.
4. E.N. Bulgakov, A. F. Sadreev. High-q resonant modes in a finite array of dielectric particles // Physical Review A, vol. 99, pp. 033851, 2019.
5. V. Karagodsky, C.J. Chang-Hasnain. Physics of near-wavelength high contrast gratings. // Optics express, vol. 20 (10), pp. 10888-10895, 2012.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ КРАЕВЫЕ СОСТОЯНИЯ В МАССИВАХ ОПТИЧЕСКИХ ДВУХМОДОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

Р. С. Савельев^{1*}, В. В. Рущкая², А. О. Михин¹, И. С. Синева¹, М. А. Горлач¹

¹Университет ИТМО, 197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург

*E-mail: r.savelev@metalab.ifmo.ru

²Университет Мартина-Лютера Халле-Виттенберг, 06120 Халле, Германия

Фотонные структуры, поддерживающие топологически нетривиальные состояния, обычно создаются путем сочетания простых мета-атомов, в идеале одномодовых, в фотонной решетке с такой симметрией, которая гарантирует их возникновение. В данной работе мы исследуем альтернативный подход, который не требует использования сложной геометрии решетки, а вместо этого использует возможность настройки параметров отдельных мета-атомов для достижения вырождения мод с различной симметрией. Мы показываем, что одномерный массив связанных двухмодовых волноводов обладает нетривиальными топологическими свойствами и поддерживает топологические краевые состояния даже с одним волноводом в элементарной ячейке. Теоретические предсказания подтверждаются в эксперименте за счет визуализации возбуждаемых состояний массива путем измерения генерируемого излучения на частоте третьей гармоники.

Фотонные топологические структуры обладают множеством уникальных физических свойств, основным примером которых является устойчивое к беспорядку однонаправленное распространение волн [1]. Для достижения таких функций в оптическом диапазоне спектра было предложено использовать массивы лазерных оптических волноводов [2]. Во многих случаях, когда доминирующую роль играет взаимодействие между ближайшими соседями, такие решетки хорошо описываются электромагнитным аналогом модели сильной связи, где константа связи определяется перекрытием затухающих хвостов волноводных мод. Весьма интересно, что во всех этих случаях волноводы рассматриваются как одномодовые, а топологические свойства зон во многом определяются выбранной геометрией решетки. В то же время топологические свойства массивов взаимодействующих многомодовых волноводов или мета-атомов остается практически неизученной, и в настоящее время доступно лишь несколько исследований по этой теме [3].

В данной работе мы рассматриваем оптические свойства специально разработанных периодических диэлектрических волноводов с квази-вырожденными модами, которые могут интерферировать в ближней зоне и приводить к сильно асимметричным картинам поля распространяющейся волны [4]. Мы показываем, что такие двухмодовые волноводы могут служить базовой составляющей для топологически нетривиальных фотонных структур с простой геометрией решетки. Для этого мы рассматриваем одномерный массив равноудаленных идентичных двухмодовых волноводов. Основываясь на симметрии профилей мод, мы определили характер взаимодействия между модами соседних волноводов, который показал, что наличие двух мод приводит к модуляции константы взаимодействия в массиве и к возникновению топологических краевых мод.

Чтобы подтвердить наши теоретические предсказания, мы рассчитали реалистичный дизайн массива волноводов, функционирующий в телекоммуникационном диапазоне длин волн около 1550 нм, показанный схематически на (рис. 1а). Периодические волноводы с субволновым периодом изготовлены из кристаллического кремния с показателем преломления $n = 3.5$, нанесенного на стеклянную подложку с $n = 1.45$. Периодичность волноводов вводится для изменения дисперсии мод таким образом, чтобы вырождение двух мод одного волновода достигалось на длине волны около 1,55 мкм.

На (рис. 1б) показаны дисперсии мод конечного массива из 11 волноводов, среди которых наблюдаются две моды с константами распространения k_z в пределах запрещенной зоны периодической структуры, которые можно идентифицировать как краевые локализованные состояния. Исследуя распределение полей мод, локализованных на краях (рис. 1в), мы замечаем, что они локализованы на обоих краях массива, поскольку между двумя краями нет физического различия.

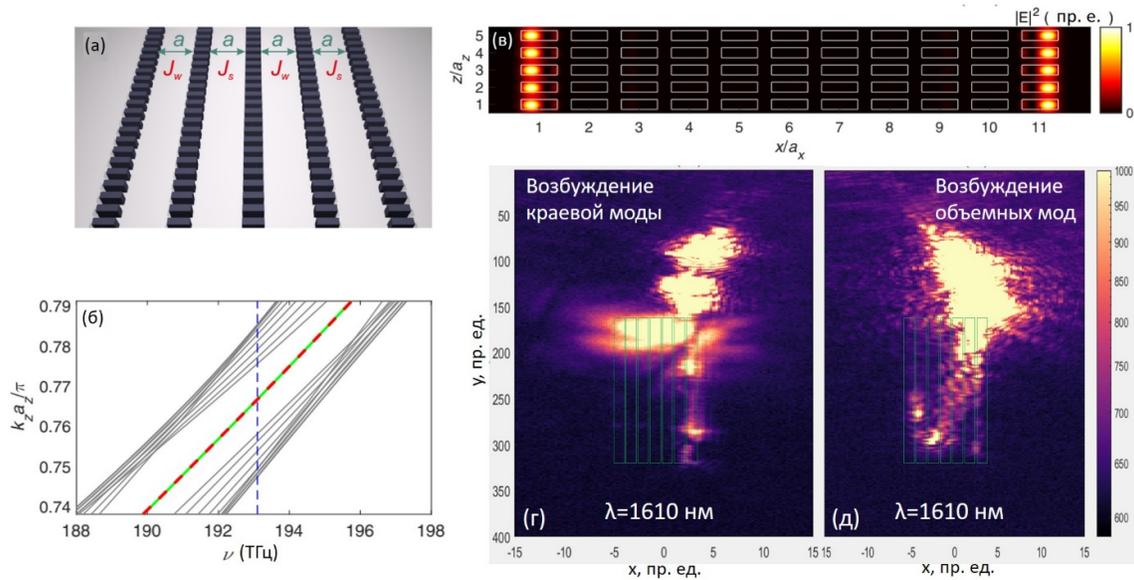


Рис. 1. (а) Схема массива периодических двухмодовых волноводов. (б) Дисперсия массива из 11 волноводов. (в) Распределение интенсивности электрического поля в краевой моде. (г, д) Интенсивность генерация третьей гармоники при возбуждении с одного из двух каналов ввода излучения; зелеными линиями показаны контуры волноводов.

Для экспериментального подтверждения теоретических результатов мы изготовили разработанную структуру из 7 волноводов при помощи электронной литографии. Излучения заводилось в массив волноводов из дальней зоны через структуру на основе направленного ответвителя, тейпера и дифракционной решетки. Далее была проведена оптическая спектроскопия изготовленных образцов метаповерхностей путем измерения интенсивности генерации третьей гармоники при возбуждении с одного из двух каналов ввода излучения. Примеры распределения интенсивности излучения показаны на (рис. 1г,д). На (г) возбуждение происходило с внешнего канала ввода излучения; в этом случае ожидалось возбуждение краевых состояний – это и удалось пронаблюдать в эксперименте. На (д), при возбуждении с внутреннего канала ввода излучения, ожидалось возбуждение объемных мод массива и дифракция по всем волноводам массива; это также было продемонстрировано в эксперименте. Таким образом, мы теоретически и экспериментально продемонстрировали, что топологические состояния могут возникать в структурах не только со специальным типом симметрии решетки, но и со специально подстроенными элементами структуры.

Исследование поддержано грантом РФФ №19-72-10129.

Список литературы

1. T. Ozawa, H. M. Price, A. Amo, N. Goldman, M. Hafezi, L. Lu, M. C. Rechtsman, D. Schuster, J. Simon, O. Zilberberg, and I. Carusotto, Topological photonics // Rev. Mod. Phys. 91, 015006 (2019).
2. A. Szameit and S. Nolte, Discrete optics in femtosecond-laser written photonic structures // J. Phys. B 43, 163001 (2010).
3. G. Cáceres-Aravena, L. E. F. Foa Torres, and R. A. Vicencio, Topological and flat-band states induced by hybridized linear interactions in one-dimensional photonic lattices // Phys. Rev. A 102, 023505 (2020).
4. R. S. Savelev, M. A. Gorlach, Topological states in arrays of optical waveguides engineered via mode interference // Phys. Rev. B 102, 161112(R) (2020).

КРАЕВЫЕ ВОЛНЫ И МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В НЕЛИНЕЙНЫХ ФОТОННЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЁТКАХ

Е. О. Смолина^{1,2*}, Л. А. Смирнов^{1,2}, Д. А. Смирнова^{1,2}

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
603905, Российская Федерация, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

*E-mail: smolina@ipfran.ru

²Институт прикладной физики Российской Академии Наук
03905, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

Мы изучили эффекты самовоздействия в фотонных топологических решётках с Керровской нелинейностью. Показано, что в континуальном пределе нелинейный волновой транспорт аналитически описывается уравнениями Дирака для спинорной волновой функции. Продемонстрировано, что каналируемый доменной стенкой импульс в топологической решётке на основе димеризованного графена является нелинейной простой волной с укучающимся по мере распространения задним фронтом. Развитие модуляционной неустойчивости нелинейных блоховских волн в киральной квадратной решетке ведёт к формированию нетривиальной поляризационной структуры, что затем позволяет извлечь топологический инвариант системы. Данный подход также применён для решёток с Флоке модуляцией наряду с изучением нелинейной динамики нестационарного суперпозиционного состояния, что в дальнейшем позволяет отличить аномальную Флоке фазу от тривиального случая.

В настоящее время актуальными являются исследования фотонных топологических изоляторов, то есть периодических структур, границы раздела в которых могут поддерживать локализованные спин-поляризованные электромагнитные моды, топологически защищённые от рассеяния на дефектах [1]. Они представляют интерес для многочисленных приложений в телекоммуникационных и вычислительных технологиях. Так как материалы, применяемые в топологической фотонике, как правило, обладают достаточно сильной оптической нелинейностью, важной задачей является изучение нелинейных эффектов в таких системах, среди которых генерация гармоник [2], эффекты самовоздействия [3] и развитие модуляционной неустойчивости [4,5].

Мы детально изучили динамику импульсных сигналов, направляемых доменными стенками в нелинейных фотонных топологических изоляторах [3]. Нами была рассмотрена доменная стенка в топологической решетке на основе димеризованного графена, составленной из одномодовых диэлектрических волноводов с керровской нелинейностью. Показано, что в случае пренебрежения пространственной дисперсией каналируемый доменной стенкой импульс представляет собой нелинейную простую волну с укучающимся по мере распространения задним фронтом. Учет пространственной дисперсии приводит к формированию квазисолитонных структур. Выполненное численное моделирование реалистичной фотонной решетки показало хорошее согласие с развитой теорией.

Кроме того, мы рассмотрели особенности нелинейных неустойчивостей, развивающихся при воздействии интенсивного лазерного излучения на топологическую фотонную решётку. Нами было показано, что сценарии развития модуляционной неустойчивости в киральной квадратной решетке с нелинейностью Керровского типа определяются топологическими свойствами энергетических зон. Анализ модуляционной неустойчивости позволяет установить топологию зонной структуры (тривиальна она или нетривиальна). Количество вихревых образований, возникающих в результате неустойчивости, квантовано, что может быть напрямую использовано для извлечения топологического инварианта [4].

Также мы предложили метод, позволяющий различать топологические фазы Флоке решёток путём анализа динамики суперпозиционных объёмных состояний [5]. Аналогично результату из [4], мы продемонстрировали, как извлекать число Черна из количества сингулярностей, возникающих в нетривиальной поляризационной структуре. Более того, мы описали схему, позволяющую идентифицировать точки инверсии высокой симметрии (dynamical symmetry inversion points), что позволяет различать аномальную Флоке фазу от тривиального случая. Эти подходы могут быть реализованы для экспериментального анализа топологических фаз света в нелинейных массивах волноводов.

Проведенные нами исследования перспективны с точки зрения проектирования новых функциональных элементов фотоники и интегральных оптических сетей, использующие локализованные топологические состояния света.

Работа выполнена в Научном центре мирового уровня «Центр фотоники» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение No. 075-15-2020-906).

Список литературы

1. T. Ozawa, H.M. Price, A. Amo, N. Goldman, M. Hafezi, L. Lu, M.C. Rechtsman, D. Schuster, J. Simon, O. Zilberberg, and I. Carusotto, “Topological photonics,” *Reviews of Modern Physics* 91, p.015006, 2019.

2. D. Smirnova, S. Kruk, D. Leykam, E. Melik-Gaykazyan, D.Y. Choi, and Y. Kivshar, “Third-harmonic generation in photonic topological metasurfaces,” *Physical Review Letters* 123, p.103901, 2019.

3. D. A. Smirnova, L. A. Smirnov, E. Smolina, Dimitris G. Angelakis, and D. Leykam. "Gradient catastrophe of nonlinear photonic valley-Hall edge pulses." *Physical Review Research* 3, p. 043027, 2021.

4. D. Leykam, E. Smolina, A. Maluckov, S. Flach, and D.A. Smirnova, “Probing band topology using modulational instability,” *Physical Review Letters* 126, p. 073901, 2021.

5. A. Maluckov, E. Smolina, D. Leykam, S. Gundogdu, D. G. Angelakis, and D.A. Smirnova, “Nonlinear signatures of Floquet band topology”, *Physical Review B* 105, p. 115133, 2022.

ТАММОВСКИЙ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОН НА ГРАНИЦЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА И АНИЗОТРОПНОГО НАНОКОМПОЗИТА, СОПРЯЖЕННОГО С ОДНОМЕРНОЙ СВЕРХРЕШЕТКОЙ

Р. К. Дойко^{1*}, А. Ю. Авдеева², С. Я. Ветров^{1,2}, Р. Г. Бикбаев^{2,1}, И. В. Тимофеев^{1,2}

¹ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 28

*E-mail: rdoyko@bk.ru

²Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок 59, стр.38

Исследован таммовский плазмон-поляритон на границе раздела между металлом и анизотропным нанокompозитным слоем, сопряженным с фотонным кристаллом. Продемонстрирована возможность управления величиной расщепления таммовского плазмон-поляритона путем варьирования формы наночастиц и поляризации падающего на структуру света. Результаты получены на основе формул модели эффективной среды.

Таммовский плазмон-поляритон (ТПП) – поверхностное состояние, локализованное на границе двух зеркал и экспоненциально спадающее с увеличением расстояния от неё. Экспериментально ТПП проявляется в виде узкого резонанса в оптическом спектре пропускания или отражения образца на длинах волн внутри фотонной запрещенной зоны [1]. Для формирования ТПП и устройств на их основе используются, как правило, металлические зеркала, сопряженные с фотонными кристаллами (ФК) – материалами, диэлектрическая проницаемость (ДП) которых меняется периодически с характерным масштабом периодичности, соизмеримым с длиной волны света [2,3].

Новые возможности появляются, если ФК-структура содержит металл-диэлектрический нанокompозит (НК). В связи с чем, открываются широкие возможности для оптимизации характеристик ТПП, локализованного на границе двух зеркал [4].

В данной работе показана поляризационная чувствительность ТПП, локализованного на границе металлического зеркала и анизотропного НК, сопряженного с одномерным ФК. С общей точки зрения одномерный ФК является одномерной сверхрешеткой.

Анизотропный НК представляет собой оптически прозрачную среду с добавлением в него металлических наночастиц эллипсоидальной формы. Для расчета оптических параметров НК была использована модель Максвелла Гарнетта, в условиях низкой концентрации наночастиц, равномерно распределённых в диэлектрической матрице [5]. Эффективная ДП анизотропного НК, со свойствами одноосного вещества, в главных осях описывается в виде диагонального тензора:

$$\hat{\epsilon}_{eff} = \epsilon_m \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp} \cos^2(\theta) + \epsilon_{\parallel} \sin^2(\theta) & 0 & \frac{1}{2} \sin(2\theta) \Delta \epsilon \\ 0 & \epsilon_{\perp} & 0 \\ \frac{1}{2} \sin(2\theta) \Delta \epsilon & 0 & \epsilon_{\parallel} \cos^2(\theta) + \epsilon_{\perp} \sin^2(\theta) \end{pmatrix},$$

где $\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$. Компоненты ϵ_{\parallel} и ϵ_{\perp} определяются с помощью модели Максвелла Гарнетта:

$$\epsilon_{\parallel, \perp} = \epsilon_d \left[1 + \frac{f(\epsilon_m(\omega) - \epsilon_d)}{\epsilon_d + (1-f)(\epsilon_m(\omega) - \epsilon_d)L_{\parallel, \perp}} \right],$$

где f – фактор заполнения; ϵ_d и $\epsilon_m(\omega)$ – ДП матрицы и металла; ω – частота; L_{\parallel} и L_{\perp} – факторы деполяризации для параллельной и перпендикулярной поляризации, соответственно.

Для анизотропного НК частоты резонансов зависят от направления электрического поля относительно оси вращения сфероида и отношения длин полярной и экваториальной полуосей наночастиц – ξ . При $\xi < 1$ наночастица представляет собой сплюснутый эллипсоид вращения, при $\xi > 1$ – вытянутый, случай $\xi = 1$ соответствует изотропному НК.

На рис. 1 приведены спектры отражения исследуемой структуры, полученные методом трансфер-матрицы в математическом пакете MatLab. Из рисунка видно, что варьирование параметра ξ приводит к расщеплению таммовского плазмон-поляритона для обеих поляризаций падающего на структуру света. При этом характер расщепления различен.

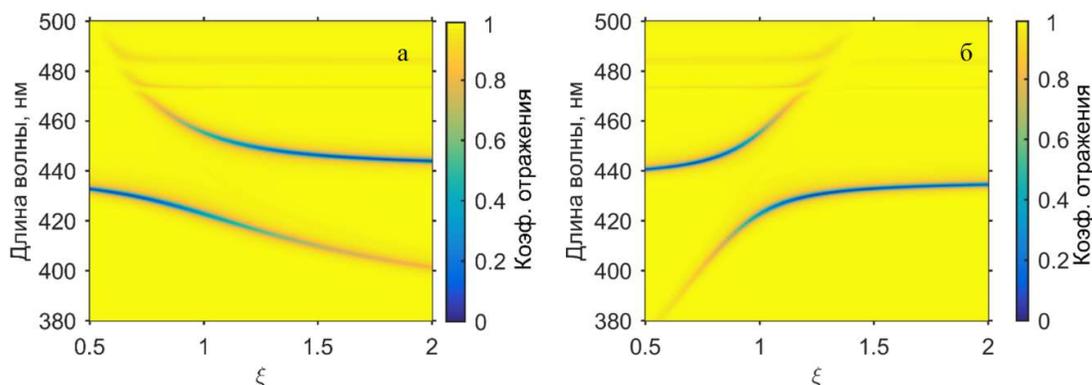


Рис. 1. Спектр отражения структуры в зависимости от ξ , для перпендикулярной (а) и параллельной (б) по отношению к оптической оси анизотропного НК поляризации света. Параметры металлического зеркала и сверхрешетки аналогичны параметрам, используемым в работе [4]. Параметры анизотропного НК: $\epsilon_d = 2,56$; $\epsilon_0 = 5$; $\hbar\omega_p = 9$ эВ; $\hbar\gamma = 0,02$ эВ; $f=0,01$; $\xi = 1,2$

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что изменение формы наночастиц в комбинации с изменением поляризации падающего света позволяет осуществлять частотную перестройку спектра, что способствует созданию селективных светофильтров.

Список литературы

1. M.E. Sasin, R.P. Seisyan, M.A. Kaliteevski et al. Tamm plasmon polaritons: Slow and spatially compact light // Applied Physics Letters. Vol. 92, no. 25. P. 251112, 2008.
2. J. D. Joannopoulos et al. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (Second Edition) // Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, P. 304. ISBN: 0691124566, 2008.
3. В. Ф. Шабанов, С.Я. Ветров, А.В. Шабанов. Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности // Изд-во СО РАН. С. 239. ISBN: 5-7692-0737-X, 2005.
4. A. Yu. Avdeeva, S. Ya. Vetrov, I. V. Timofeev. Splitting of a tamm plasmon polariton at the interface between a metal and a resonant nanocomposite layer conjugated with a photonic crystal // J. Opt. Soc. Am. B 38. 1792. 2021.
5. Р. Г. Бикбаев, С.Я. Ветров, И.В. Тимофеев. Оптические таммовские состояния на границе фотонного кристалла и сильно анизотропного нанокompозита // Ученые записки физического факультета МГУ. Т. 4. С. 154330–154332, 2015.

ФОКУСИРОВКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

А.Ю. Ветлужский

*Институт физического материаловедения СО РАН
660047, Российская Федерация, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6
E-mail: vay@ipms.bsnet.ru*

Рассматриваются методы фокусировки электромагнитных волн, основанные на использовании двумерных фотонных кристаллов, образованных металлическими и диэлектрическими элементами. В первом случае физическая основа создания систем фокусировки излучения заключается в проявлении такими фотонными кристаллами на частотах первой разрешенной зоны свойств однородной среды с ультранизкими значениями показателя преломления. Во втором – для фокусировки используется возможность конструктивной интерференции волн прямого прохождения и краевых волн, дифрагирующих на краях пространственно ограниченных диэлектрических структур.

Как известно, фотонные кристаллы (ФК) – это среды с периодически меняющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью с масштабом периодичности, сопоставимым с длиной волны электромагнитного излучения. Особое место среди ФК занимают металлические структуры (*wire media*). Наиболее распространенным их видом являются двумерно-периодические решетки, образованные цилиндрическими элементами малого радиуса, имеющие высокую проводимость в радио- и инфракрасном диапазонах. Основной особенностью таких ФК является наличие полной низкочастотной запрещенной зоны. Физический механизм, приводящий к ее формированию, не связан с брэгговским рассеянием, а может быть объяснен на основе проведения прямой аналогии между возбуждением среды из тонких проводников с поведением плазмонных образований в твердом теле.

Существование низкочастотной запрещенной зоны позволяет говорить о том, что на частотах ниже пороговой (плазменной) металлические ФК могут рассматриваться в качестве материалов с отрицательными значениями диэлектрической проницаемости (ϵ – негативных сред). Кроме того, на частотах выше плазменной такие структуры характеризуются значениями эффективного показателя преломления меньшими единицы [1], что дает основания рассматривать их не только как ФК, но и как своеобразные метаматериалы.

Описанные свойства двумерных металлических ФК обуславливают возможность их применения в качестве эффективных устройств преобразования пространственного распределения электромагнитного излучения. В частности, целью доклада является анализ путей использования таких ФК как фокусирующих систем инфракрасного диапазона, работа которых основана на возникновении явления полного внутреннего отражения волн на границах таких структур на частотах первой разрешенной зоны.

Одним из направлений практического применения металлических ФК могут служить линзовые системы. На рис. 1а приведены результаты моделирования работы простейшей фокусирующей системы на основе металлического ФК представленной геометрией. Следует отметить хорошую степень фокусировки, достигаемой при помощи достаточно малоэлементной структуры. Однако основной практический интерес, по видимому, могут представлять сложные линзовые системы на основе ФК, например, линзы Люнеберга.

Другим примером использования необычных преломляющих свойств металлических ФК могут являться коллиматоры или, другими словами, системы, трансформирующие излучаемую локальным источником цилиндрическую волну в волну, близкую по своим свойствам к плоской. Особенно эффективны такие устройства окажутся на частотах, граничных между запрещенными и разрешенными зонами, где показатель преломления метаматериала стремится к нулю. На рис. 1б представлены результаты вычислительного эксперимента, демонстрирующего возможность такого применения

металлических ФК. Отметим, что наблюдаемая на рисунке «делокализация» излучения указывает на возможность и обратного преобразования – энергия падающих на ФК плоских волн может, при соответствующем выборе параметров, фокусироваться внутри структуры.

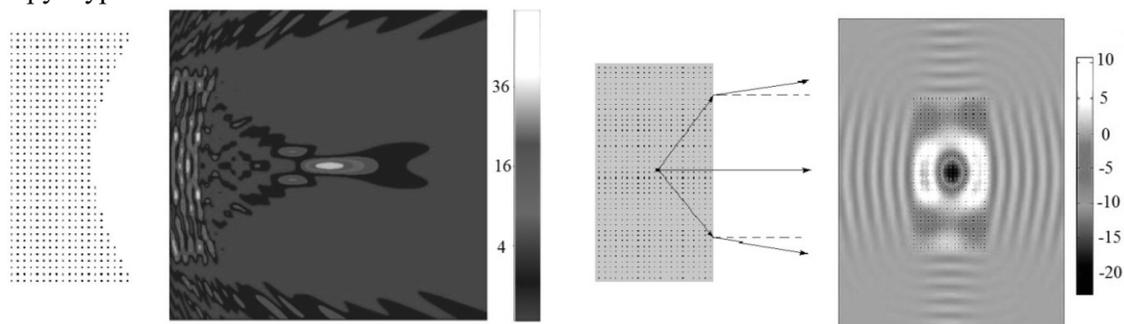


Рис. 1. (а) – конфигурация плоско-вогнутой линзы из металлического ФК и пространственное распределение интенсивности поля; (б) – концептуальная схема вычислительного эксперимента и картина пространственного распределения интенсивности излучения в коллиматоре на основе того же ФК.

Фокусирующие системы могут создаваться и на основе диэлектрических ФК, поскольку, являясь дискретными, они определяют иной характер дифракционных эффектов на своих границах, чем на краях однородных диэлектриков конечных размеров.

Рассмотрим падение плоской волны на ФК прямоугольной формы, представляющий собой квадратную решетку диэлектрических цилиндров. На рис. 2а линиями 1–3 обозначены три волны. Первая – это волна, прошедшая через центральную область ФК, и запаздывающая по фазе относительно волн, распространяющихся в окружающем пространстве, поскольку эффективный показатель преломления диэлектрического ФК больше единицы. Цифрами 2 и 3 обозначены волны, распространяющиеся вдоль края ФК. Их фазовая скорость, очевидно, представляет собой взвешенное среднее между скоростями движения волны в ФК и вне его (пунктирные линии на рис. 2а). Таким образом, краевые волны распространяются с большей скоростью, чем волны, идущие вдоль оси симметрии ФК, что должно приводить к их конструктивной интерференции в некоторых точках на этой оси. Сам ФК при этом приобретает свойства своеобразной линзы, фокусирующие свойства которой связаны не с ее геометрией, а с разными фазовыми набегами волн, прошедшими через различные ее области.

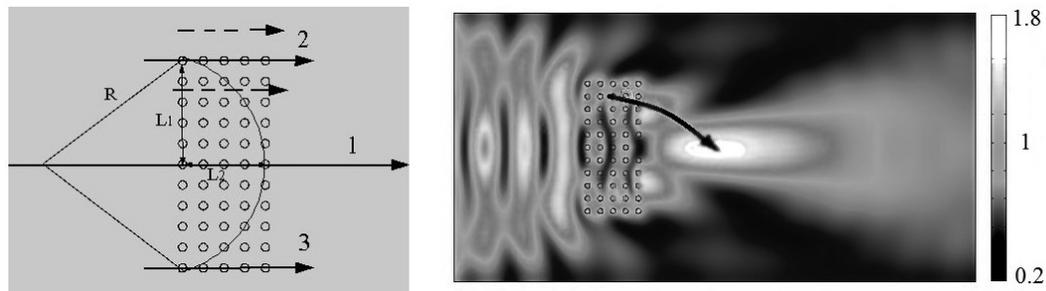


Рис. 2. (а) – схема, демонстрирующая типы волн, распространяющихся через ФК; (б) – распределение поля при дифракции плоской волны на диэлектрическом ФК на частоте фокусировки.

Исследование поддержано Министерством образования и высшей школы РФ (грант № 075-15-2020-787).

Список литературы

1. Simovski C.R., Belov P.A., Atrashchenko A.V., Kivshar Y.S. Wire metamaterials: Physics and applications // *Advanced materials*. – 2012. – V. 24. – P. 4229-4248.

УСИЛЕНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО КВАНТОВОГО ИСТОЧНИКА СО СТРУКТУРИРОВАННЫМ ОПТИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДОМ

И. А. Волков^{1*}, Р. С. Савельев¹

¹Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.
*E-mail: ilya.volkov@metalab.ifmo.ru

В данной работе мы предлагаем последовательный подход к дизайну волноводной структуры, обеспечивающей однонаправленное усиление излучения квантовых источников с круговой поляризацией дипольного момента перехода. Суть нашего метода состоит в конструировании дисперсии волноводной моды структуры, обладающей стационарной точкой перегиба на интересующих нас частотах, что приводит к усилению взаимодействия рассматриваемой моды с дипольным источником. Кроме того, распределение поля данной моды обладает круговой поляризацией в преобладающей части сечения волновода, параллельного подложке, из-за чего система устойчива к изменению положения квантового источника.

В последние годы происходит бурное развитие в области квантовых вычислений и коммуникаций, для которой требуются различные устройства, способные контролировать взаимодействие света с веществом на уровне одиночных фотонов. Одним из перспективных методов к созданию таких устройств является усиление эффективности асимметричного взаимодействия источника излучения и волноводной моды, необходимое для минимизации излучения в окружающее пространство или в другие моды волноводной структуры. Однако, во многих актуальных работах [1] по данной тематике используются моды с существенной групповой скоростью, что негативно сказывается на эффективности их взаимодействия с источником. Другой важной проблемой является сильная зависимость характера взаимодействия источника излучения и волноводной моды от положения источника в существующих на данный момент конфигурациях, таких как однородный волновод [2] и волновод на основе фотонного кристалла [3]. Это приводит к потере однонаправленности излучения при некотором смещении источника, что влечет дополнительные технологические сложности при изготовлении таких структур.

Дизайн предлагаемой волноводной структуры, обеспечивающей эффективное и устойчивое взаимодействие с циркулярно поляризованными дипольными источниками, основан на особом типе волноводной дисперсии $\omega(k)$, содержащей стационарную точку перегиба, то есть точку, в которой групповая скорость $d\omega/dk$ и дисперсия групповой скорости $d^2\omega/dk^2$ равны нулю. Известно, что такой тип дисперсии возникает, когда дисперсии по крайней мере трех базисных мод связаны определенным образом, образуя особую точку с вырождением третьего порядка [4]. В данной работе мы рассматриваем структуру, в которой две из трех мод принадлежат одному и тому же периодическому волноводу, а третья принадлежит вспомогательному пространственно разделенному однородному волноводу, как показано на (рис. 1).

Такая структура демонстрирует несколько полезных свойств, применимых для асимметричного взаимодействия света с веществом. Во-первых, групповая скорость гибридной моды на определенной частоте бесконечно мала, а значит, на той же частоте плотность фотонных состояний стремится к бесконечности, следовательно связь точечного дипольного источника с этой модой принципиально не ограничена и теоретически может быть сколь угодно сильной. Во-вторых, поскольку локальная поляризация поля определяется типом связи между модами, которым можно управлять, меняя геометрию структуры, становится возможной разработка волновода с круговой локальной поляризацией электрического поля и, таким образом, достижение полностью асимметричной связи дипольного источника с модами, распространяющимися в прямом и обратном направлении по волноводу. Наконец, распределение поля базисных мод, которое ведет себя достаточно однородно внутри периодического волновода наследуется гибридной модой. Это позволяет поддерживать эффективную и асимметричную связь с одиночным квантовым излучателем, расположенным не только в определенной точке, но и в случайной точке в относительно большой области.

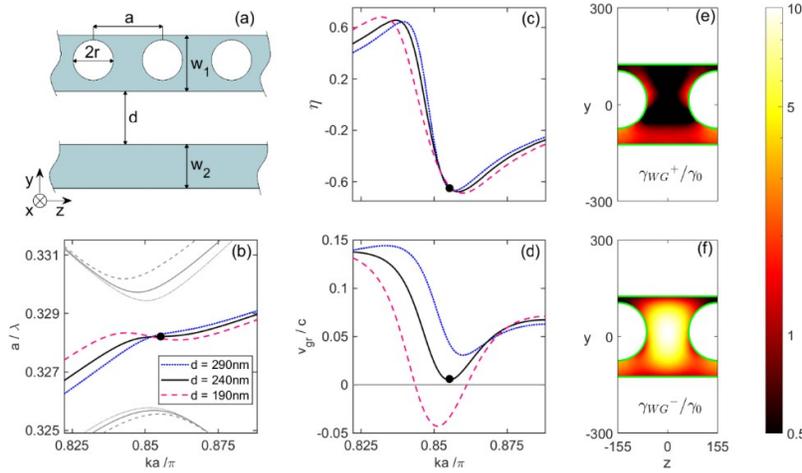


Рис. 1. а) Дизайн волноводной структуры со смещенными круглыми отверстиями. Параметры системы: толщина структуры $h = 245$ нм, $r = 90$ нм, $a = 310$ нм, $w_1 = 250$ нм, $w_2 = 197$ нм, сдвиг отверстий периодического волновода в положительном y направлении $\delta y = 15$ нм. (b-d) Дисперсия, групповая скорость и параметр асимметрии η как функции волнового числа для 3 разных расстояний между волноводами. (e,f) Скорость испускания диполя в гибридную моду в (e) положительном y и (f) отрицательном y направлениях как функция положения в сечении $x = 90$ нм периодического волновода. Панели (e,f) построены для расстояния $d = 240$ нм между волноводами

Для оценки устойчивости асимметричной связи относительно положения источника, нами вводится параметр асимметрии $\eta = \frac{\langle |E_r|^2 - |E_l|^2 \rangle}{\langle |E_r|^2 + |E_l|^2 \rangle}$, где $E_{r,l}$ – проекции комплексной амплитуды электрического поля на орты $\mathbf{e}_{r,l} = \frac{\mathbf{e}_y \pm i\mathbf{e}_z}{\sqrt{2}}$, при этом усреднение происходит по сечению периодического волновода в плоскости $x = 90$ нм, параллельной плоскости подложки.

Также, в приближении слабой связи квантового источника и волноводной моды, мы оценили скорость испускания диполя в гибридную моду волновода в зависимости от положения источника и сравнили её с расчётом в конечной системе, что было показано в работе [5].

Исследование поддержано РФФ №19-72-10129. Вычисления направленности в конечной системе были поддержаны грантом Президента РФ МК-4418.2021.1.2.

Список литературы

1. P. Lodahl, S. Mahmoodian, S. Stobbe et al. Chiral quantum optics // Nature. — 2017. Vol. 541. P. 473–480.
2. R. J. Coles, D. M. Price, J. E. Dixon et al. Chirality of nanophotonic waveguide with embedded quantum emitter for unidirectional spin transfer // Nature Communications. — 2016.
3. M. Arcari, I. Sollner, A. Javadi et al. Near-Unity Coupling Efficiency of a Quantum Emitter to a Photonic Crystal Waveguide // Phys. Rev. Lett. 2014. Aug. Vol. 113. P. 093603.
4. Nadav Gutman, W. Hugo Dupree, Yue Sun et al. Frozen and broadband slow light in coupled periodic nanowire waveguides // Optics Express. — 2012.
5. Volkov I.A. and Savelev R.S. Unidirectional coupling of a quantum emitter to a subwavelength grating waveguide with engineered stationary inflection point // Phys. Rev. B – 2021, 104, 245408

МНОГОСЛОЙНАЯ СТРУКТУРА ОКСИДА ТАНТАЛА И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИ АНОДНО-ЭЛЕКТРОЛИЗНОМ ФОРМИРОВАНИИ В ХИМИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ВОДЕ

А. П. Бойченко*, О. В. Клевцов

Кубанский государственный университет
350040, Российская Федерация, Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149
*E-mail: Bojchenco@yandex.ru

В работе представлены результаты по анодно-электролизному формированию оксида тантала в химически чистой (дистиллированной) воде электропроводностью не более $1,7 \cdot 10^{-4}$ S/m и явлению генерации сопровождающей этот процесс интенсивной электролюминесценции. Показана особенность кинетики последней, заключающаяся в импульсном (вспышечном) характере протекания, преимущественно на завершающей стадии анодирования металла и многослойная структура формируемого в воде оксида, состоящая из набора хаотично распределенных пор диаметром от 40 nm до 1 μ m.

Металлический тантал (Ta), как и его оксид (Ta₂O₅) используются в настоящее время во многих областях науки и техники, начиная от научного приборостроения, электротехнической промышленности и биомедицинских приложений и заканчивая ядерной энергетикой. Для формирования пленки Ta₂O₅ на поверхности металла обычно привлекают его анодно-электролизное окисление в различных электролитах на водной основе [1, 2], а сопровождающее этот процесс явление электролюминесценции (ЭЛ) рассматривается как одно из информативных средств его контроля [3, 4]. Вместе с тем масштабное привлечение ЭЛ-методики для этого сдерживается не до конца выясненной природы излучения и по настоящее время носящей дискуссионный характер. Как показывает библиографический анализ, ситуация осложняется еще и тем, что для анодирования Ta и исследования сопровождающей этот процесс ЭЛ разные авторы используют большое многообразие различных видов электролитов, их концентраций, композиций, условий и режимов анодного окисления металла [1–4]. Это существенно осложняет интерпретацию и затрудняет сопоставление результатов, так как в такой ситуации приходится учитывать многочисленные продукты электролиза растворенных в воде веществ, захватываемые образующимся Ta₂O₅. Исключить влияние электролитных добавок на формирование Ta₂O₅ и упростить интерпретацию результатов исследований его ЭЛ оказывается возможным при анодировании металла в воде с минимальной концентрацией примесей, которая позволяет ее относить к химически чистой. Это перекипяченная дистиллированная, бидистиллированная и деионизованная вода. Начиная с 1962 г. о такой возможности анодирования сообщили авторы работы [5], продемонстрировав электролизное формирование оксидной пленки в деионизованной (обессоленной) воде на примере кремния *n*- и *p*-типов. Спустя более полувека подобные работы на анодах из цинка и алюминия были проведены группами исследователей [6, 7], а в 2019 г. при тех же условиях анодирования на примере титана, вольфрама, индия, галлия, кремния, алюминия, ниобия и Ta была обнаружена их ЭЛ в потенциостатическом режиме при напряжении от 500 до 1200V [8]. Однако в перечисленных работах преимущественно исследована ЭЛ оксида алюминия при его формировании в дистиллированной воде (ДВ) [8]. Настоящая работа посвящена результатам первых исследований явления при анодно-электролизном формировании пленки Ta₂O₅ в ДВ и его морфо-структурным особенностям.

Исследования проводились на ранее описанной установке по методике [8] с Ta-проволокой диаметром 0,5 mm и чистотой металла 99,99 %, который служил анодом. Время его окисления в ДВ электропроводностью порядка $1,7 \cdot 10^{-4}$ S/m при постоянном напряжении 1,2 kV и температуре 298 K составляло 1700 s. За это время регистрировались плотность тока (*J*), протекающего через оптико-электролизную ячейку, и кинетика светимости (*I*) образующегося Ta₂O₅. Структура последнего визуализировалась на растровом электронном микроскопе с увеличением изображений до 15000 раз. На рис. 1 представлены результаты проведенных исследований.

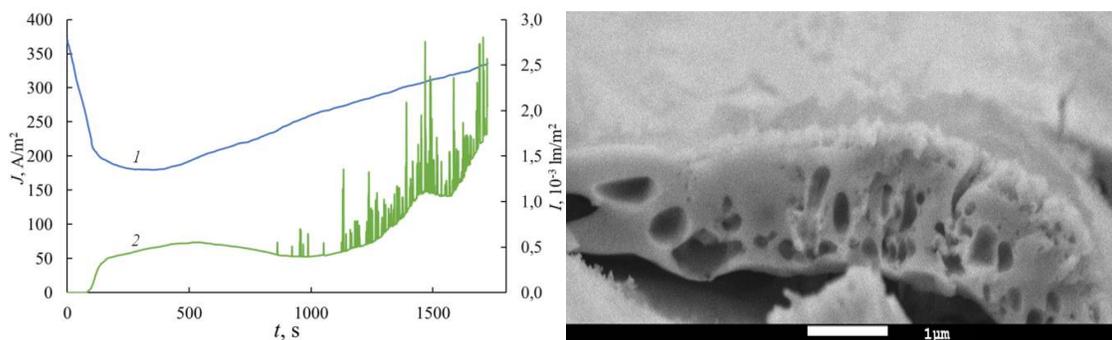


Рис. 1. Кинетики изменения (слева) J – (1) и I – (2); РЭМ-изображение поперечного скола Ta_2O_5 (справа), сформированного за время анодирования 1700 s

По нему видна характерная особенность, зарегистрированная нами пока только для анодируемого Ta (по сравнению с остальными исследованными металлами) в ДВ и другими авторами в водных растворах электролитов: ЭЛ формирующегося Ta_2O_5 в воде носит вспышечный характер, периодичность и светимость которых возрастает к концу анодирования, достигая $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ lm/m}^2$ при токе $\sim 320 \text{ A/m}^2$. При этом оксидная пленка также имеет морфоструктурные особенности. В ней четко выделяются два разнотолщинных слоя: нижний слой толщиной порядка $1,5 \text{ }\mu\text{m}$ состоит из хаотично распределенных пор диаметром от 40 nm до $1 \text{ }\mu\text{m}$ и верхний – толщиной $\sim 220 \text{ nm}$ без какой-либо четко выраженной структурной организации. При этом, как видно из рис. 1, имеется некоторая часть открытых пор, перекрывающих нижний и верхний слой оксидной пленки. Описанная структура кардинально отличается от таковой, например, для оксида алюминия, полученного в аналогичных условиях и режимах, как и генерируемой при этом ЭЛ [6, 8], что указывает на иные механизмы протекания процессов и явлений, связанных с физико-химической природой самого Ta.

Список литературы

1. Zaffora A, Franco F., Quarto F., Santamaria M. Optimization of anodizing process of tantalum for Ta_2O_5 -based capacitors // J. of Solid State Electrochemistry, vol. 24, pp. 2953–2962, 2020.
2. Chena W., Tua Q., Wua H., et.al. Study on morphology evolution of anodic tantalum oxide films in different using stages of H_2SO_4/HF electrolyte // Electrochimica Acta, vol. 236, pp. 140–153, 2017.
3. Stojadinović S., Jovović J., Petković M. Spectroscopic and real-time imaging investigation of tantalum plasma electrolytic oxidation (PEO) // Surface & Coatings Technology, vol. 205, pp. 5406–5413, 2011.
4. Stojadinović S., Tadić N., Vasilić R. Luminescence of oxide films during the electrolytic oxidation of tantalum // Electrochimica Acta, vol. 152, pp. 323–329, 2015.
5. Дубровский Л.А., Мельник В.Г., Одынец Л.Л. Анодное окисление кремния в чистой воде // Журнал физической химии, т. 36, № 10, с. 2199–2204, 1962.
6. Lisenkov, A.D., Poznyak S.K., Zheludkevich M.L., et al. Aluminum anodization in deionized water as electrolyte // J. Electrochem. Soc., vol. 163, pp. 364–368, 2016.
7. Voon C.H., Derman M.N., Hashim U., et. al. Synthesis of nanoporous zinc oxide by anodizing of zinc in distilled water // Appl. Mech. Mater, vol. 754-755, pp. 1126–1130, 2015.
8. Овеченко Д.С., Бойченко А.П. Термовлияние на кинетику электролюминесценции алюминия и тантала при их анодировании в дистиллированной воде // Экологический вестник научных центров ЧЭС, т. 16, № 2, с. 59–67, 2019.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЛОТНОСТЬ ФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

П. В. Долганов^{1*}, К. Д. Бакланова^{1,2}, В. К. Долганов¹

¹*Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна Российской академии наук
142432, Российская Федерация, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 2*

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

²*Национальный государственный университет Высшая школа экономики
100991, Российская Федерация, Москва, ул. Мясницкая, д. 10*

Приводятся результаты оптических исследований жидкокристаллических фотонных кристаллов с одномерным и трехмерным упорядочением. Различными методами определена плотность фотонных состояний.

Холестерические жидкие кристаллы и голубые фазы представляют собой фотонно-кристаллические структуры с одномерным и трехмерным пространственным упорядочением. Несмотря на существенный прогресс, достигнутый в исследованиях в последние годы, целый ряд вопросов относительно фотонных свойств хиральных жидкокристаллических фотонных кристаллов остается до конца не проясненными.

В докладе излагаются результаты комплексных исследований оптических свойств жидкокристаллических фотонных кристаллов с одномерным и трехмерным упорядочением. На образцах высокого совершенства проведены измерения спектров пропускания, отражения, вращения плоскости поляризации света, люминесценции. Изучена трансформация оптических характеристик с изменением толщины образцов и температуры. В спектрах вращения плоскости поляризации света вне фотонной зоны наблюдаются осцилляционные особенности, предсказываемые теорией. Проанализированы поляризационные свойства света, прошедшего через фотонный кристалл. В образцах малой толщины внутри фотонной зоны проходящий свет эллиптически поляризован, вне фотонной зоны поляризация света близка к линейной с небольшими осцилляциями эллиптичности, положения которых коррелируют с осцилляциями в спектрах вращения плоскости поляризации.

С использованием комбинации методик, в том числе разработанных и впервые использованных нами [1-3], определена плотность фотонных состояний в одномерных и трехмерных фотонных кристаллах. Экспериментальные результаты сопоставлены с аналитической теорией и результатами численных расчётов. Наблюдается хорошее согласие экспериментальных и расчётных спектров плотности фотонных состояний. Результаты исследований демонстрируют возможность применения использованных нами методов определения плотности фотонных состояний в других средах с нарушением зеркальной симметрии.

Исследование поддержано Государственным заданием ИФТТ РАН.

Список литературы

1. P.V. Dolganov, G.S. Ksyonz, V.E. Dmitrienko, V.K. Dolganov, Description of optical properties of cholesteric photonic liquid crystals based on Maxwell equations and Kramers-Kronig relations // Phys. Rev. E, vol. 87, p. 032506, 2013.
2. P.V. Dolganov, Density of photonic states in cholesteric liquid crystals // Phys. Rev. E, V. 91, p. 042509, 2015.
3. P.V. Dolganov, K.D. Baklanova, A.Yu. Bobrovsky, Photonic properties of polymer-stabilized photosensitive cholesteric liquid crystal studied by combination of optical activity, transmission and fluorescence // Liq. Cryst. 2021. V. 48, pp. 1339-1348, 2021.

ОПТИЧЕСКАЯ БИСТАБИЛЬНОСТЬ И НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ В КОНЕЧНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Г.В. Шадрин^{1*}, Е.Н. Булгаков²

¹Институт вычислительного моделирования, ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 44

*E-mail: galiy_sha@mail.ru

²Институт Физики им.Л.В.Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 38

Исследовалась оптическая бистабильность и явление нарушения симметрии в системе связанных фотонно-кристаллических микрорезонаторов с включениями из материала с керровской восприимчивостью при падении плоской волны. Показано, что оба явления сильно зависят как от угла падения, так и интенсивности поля. Обнаружены и исследованы различные режимы.

Нелинейное распространение света в периодических структурах является привлекательной областью исследований и приложений. Специальный класс таких структур – фотонные кристаллы (ФК) обладают так называемой полной запрещенной щелью, что позволяет создавать на их основе простые и разветвленные волноводные структуры, резонансные микрополости, за счет чего удается эффективно управлять линейным и нелинейным распространением света [1]. Наиболее яркими примерами нелинейных эффектов в ФК микроструктурах являются генерация гармоник, оптические переключатели, диоды и транзисторы.

Ключевую роль при нелинейном распространении света играют явления оптической бистабильности (ОБ) и нарушение симметрии (ЯНС) при симметричном расположении структуры.

В данной работе мы предлагаем использовать простой дизайн оптической микроструктуры, представляющей собой двумерный ФК конечных размеров, содержащий одну или несколько взаимодействующих резонансных микрополостей, в центр каждой помещен диэлектрический цилиндр из керровского материала (нелинейный микрорезонатор) (рис. 1). Для численного расчета электромагнитного поля в такой структуре было выполнено обобщение модального метода Т-матрицы [2] на случай нелинейных микрорезонаторов, поддерживающих одну монополюсную моду. Используя этот метод, исследовались явления оптической бистабильности и нарушения симметрии при рассеянии плоской волны при различных углах падения. Оба явления наблюдаются при низкой мощности падающей волны и сильно зависят от угла падения. Преимущество данного дизайна по сравнению с ранее предложенными состоит в отсутствии волноводных каналов, благодаря чему внешняя плоская волна непосредственно взаимодействует с резонансными модами микрорезонаторов.

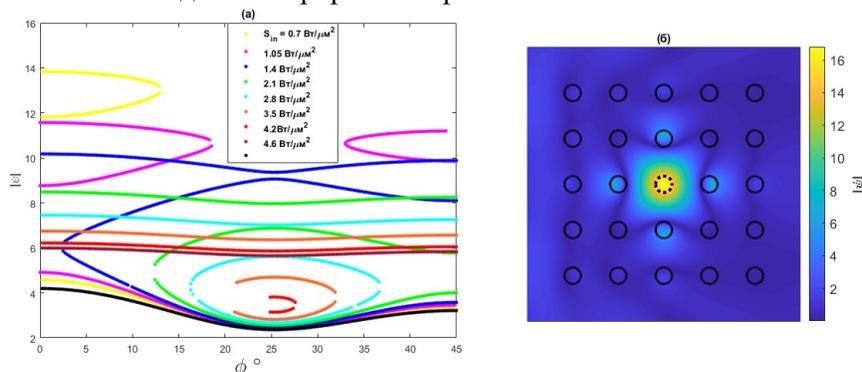


Рис. 1. а) Численно рассчитанная относительная амплитуда поля $|\psi|$ на дефектном цилиндре как функции угла падения плоской волны. Мощности падающей волны указаны для ФК, состоящего из 25 цилиндров, образующих квадрат 5 на 5 цилиндров. Параметры цилиндров: проницаемость 11.56, радиус 0.18 $\mu\text{м}$, проницаемость центрального цилиндра $3+2\cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{Вт}\cdot S_{in}$. Частота падающей волны $k_{0a} = 0.35587$. б) Волновая функция для ФК 5x5 цилиндров (для этой системы получен рис. 1а) при угле падения 0.

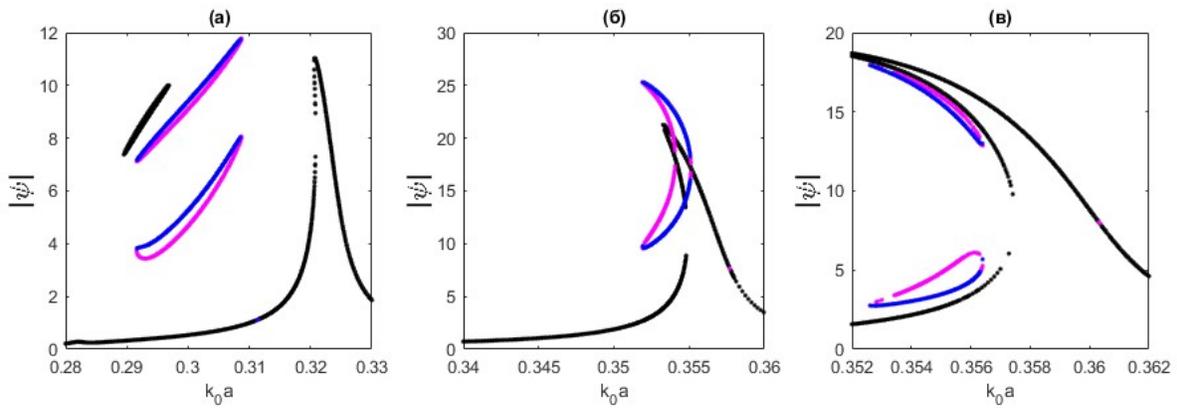


Рис. 2. Относительная амплитуда поля $|\psi|$ на двух дефектных цилиндрах а) кристалл 5×6 цилиндров, дефектные цилиндры расположены на соседних позициях в центральной части кристалла; $S_{in} = 0.98 \text{ Вт}/\mu\text{м}^2$ б) кристалл 5×8 цилиндров, между дефектными цилиндрами располагается 2 обычных; $S_{in} = 0.98 \text{ Вт}/\mu\text{м}^2$ в) кристалл 5×9 , дефектные цилиндры разделены тремя обычными; $S_{in} = 0.98 \text{ Вт}/\mu\text{м}^2$.

Черным цветом обозначены симметричные решения, розовым и синим – нарушающие симметрию.

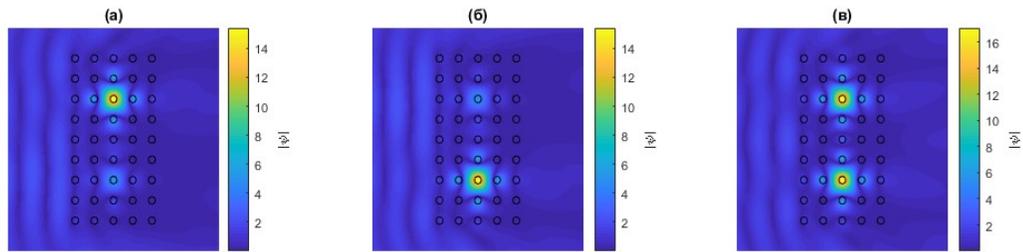


Рис. 3. Варианты возбуждения ФК 5×9 с двумя керровскими цилиндрами: а) нарушенная симметрия, высвечивается только верхний цилиндр, б) только нижний, в) полностью симметричный случай. Частота падающей волны $k_{0a} = 0.355575$, $S_{in} = 0.525 \text{ Вт}/\mu\text{м}^2$, радиусы цилиндров $0.18a$, постоянная решетки $= a$.

Список литературы

1. Joannopoulos, J. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light / J. Joannopoulos, S.Johnson, J. Winn et al. // Princeton: Princeton University Press, 2007.
2. Yasumoto, K. Electromagnetic Theory and Applications for Photonic Crystals / K. Yasumoto // New York: Taylor & Francis, 2006.

МОДЫ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ В КЕКУЛЕ-СТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ

Е. О. Смолина^{1,2*}, Д. А. Смирнова^{1,2}

¹*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
603905, Российская Федерация, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23*

*E-mail: smolina@ipfran.ru

²*Институт прикладной физики Российской Академии Наук
03905, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46*

Изучены моды топологического дефекта, образованного сочленением трёх доменов в Кекуле-структурированной метаповерхности. Структура спектрально изолированного связанного состояния, интенсивность поля в котором спадает с увеличением расстояния от центра сочленения, получена в полномасштабном численном моделировании метаповерхности, и аналитически проанализирована с помощью метода сильной связи и континуальных уравнений Дирака. Показано, что излучение этой моды в дальней зоне обладает нетривиальной спиральной поляризационной структурой.

Функции оптической обработки информации в микрочипах подразумевают необходимость точного управления светом на субволновых масштабах и в наноструктурах. В последнее десятилетие в связи с этим активно развивается такое направление, как топологическая фотоника [1]. В его рамках изучают искусственные электромагнитные материалы, которые, по аналогии с топологическими изоляторами из физики твёрдого тела, могут поддерживать топологические состояния, обладающие особой устойчивостью и малой чувствительностью к помехам, несовершенствам фабрикации и рассеянию на дефектах, что позволяет обеспечить надёжные каналы для распространения сигналов и их спектральную стабильность. В частности, особенно актуальными являются исследования пространственно локализованных спектрально-изолированных нуль-мерных мод топологических дефектов в метаповерхностях, что может быть перспективно в том числе для разработки квантовых излучателей, нано-лазеров и других элементов интегральной фотоники [2,3].

Нами были исследованы связанные состояния, локализованные около топологического дефекта в наноструктурированной метаповерхности симметрии C_6 , представляющей собой кремниевую мембрану с треугольными отверстиями, находящуюся на сапфировой подложке, параметры которой были оптимизированы с помощью методов машинного обучения. В данном дизайне топологический дефект является Y-образным сочленением трёх доменов в гексагональной решётке с введенной деформацией Кекуле. Каждый из доменов соответствует различному выбору элементарной ячейки. В такой геометрии линии, исходящие из сочленения, формируют три интерфейса со смещением, которые поддерживают краевые моды, в спектре которых имеется стоп-зона. В полномасштабном численном моделировании метаповерхности с использованием метода конечных элементов было найдено спектрально изолированное угловое состояние, интенсивность поля в котором спадает с увеличением расстояния от центра сочленения. Его частота находится в центре щели зонной структуры. Используя численно полученное распределение поля, была восстановлена трёхлепестковая диаграмма направленности излучения моды в дальней зоне, характеризующаяся наличием сингулярности в нормальном направлении и нетривиальной спиральной поляризационной структурой, направление кручения в которой определяется коэффициентом Кекуле кластеризации.

Аналитически такая система была описана с использованием методов теории групп, что позволило выбрать подходящий базис, в котором сочленение удобно описывается с помощью системы уравнений Дирака. Математически введение кластеризации в системе Дирака аналогично наличию параметра порядка в физике сверхпроводников, который открывает щель в зонной структуре. Далее, в континуальной модели нами было получено аналитически пространственное распределение локализованного в области сочленения собственного состояния Гамильтониана Дирака с нулевой энергией, что

соответствует моде с частотой в центре запрещённой зоны. Найденная форма связанного состояния полностью совпадает с локализованной собственной модой Гамильтониана решётки в методе сильной связи и согласуется с результатами полномасштабного численного моделирования метаповерхности. Такие особенности распределения поля в дальней зоне, как спиральная нетривиальная поляризационная структура и её направление кручения, также подтверждаются с использованием теоретически найденного профиля при переходе в базис дипольных и квадрупольных мод, где поляризационная спираль представляет собой суперпозицию левополяризованной и правополяризованной дипольных мод с одинаковыми амплитудами и отстройкой фазы, равной $\pi/2$.

Исследование поддержано Минобрнауки в рамках соглашения 0729-2021-013.

Список литературы

1. Ozawa T. et al. "Topological photonics", *Reviews of Modern Physics*. 91, p. 015006, 2019.
2. Noh, Jiho, et al. "Topological protection of photonic mid-gap defect modes." *Nature Photonics* 12.7, p. 408-415, 2018.

СУБРАДИАЦИОННЫЕ ОДНОФОТОННЫЕ И ДВУХФОТОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В ДВУМЕРНЫХ АНСАМБЛЯХ КВАНТОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Н. А. Устименко^{1*}, И. А. Волков¹, Д. Ф. Корнован¹, Р. С. Савельев¹, А. С. Шеремет¹,
М. И. Петров¹

¹Физический факультет, Университет ИТМО
197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49а
*E-mail: nikita.ustimenko@metalab.ifmo.ru

Мы теоретически исследуем одно- и двухчастичные долгоживущие возбуждения в двумерных олигомерах двухуровневых электродипольных излучателей. Показано, что при определённом пространственном упорядочении излучателей можно добиться подавления излучения (спонтанной эмиссии) в дальнее поле за счёт формирования коллективных субрадиационных состояний в ансамбле, и предложен физический механизм формирования таких состояний на основе теории связанных мод.

Активное развитие технологических подходов в атомной оптике и нанооптомеханике в последние годы позволило организовывать атомы в упорядоченные структуры, в том числе в виде двумерных ансамблей [1]. На фоне развития оптических технологий точного позиционирования атомов появились экспериментальные работы по приложениям подобных систем [2]. Однако возможности по применению ансамблей атомов ограничены в связи с явлением спонтанной эмиссии. Известно, что одиночный квантовый излучатель (атом, квантовая точка и т. п.) в свободном пространстве обычно имеет довольно малое время жизни вследствие взаимодействия с вакуумными флуктуациями электромагнитного поля, приводящего к спонтанному испусканию фотона. Однако в ансамбле квантовых излучателей за счёт их пространственного упорядочения, которое влияет на взаимодействие между излучателями, и формирования так называемых субрадиационных (а значит высокодобротных и долгоживущих) коллективных состояний, возможно добиться деструктивной интерференции между различными каналами излучения фотонов и значительного увеличения коллективного времени жизни по сравнению с временем жизни одиночного излучателя [3].

Мы теоретически исследуем субрадиационные состояния в олигомере двухуровневых идентичных атомов, имеющих электродипольный переход на частоте $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$ (рис. 1). В этой структуре атомы расположены в вершинах двух правильных шестиугольников

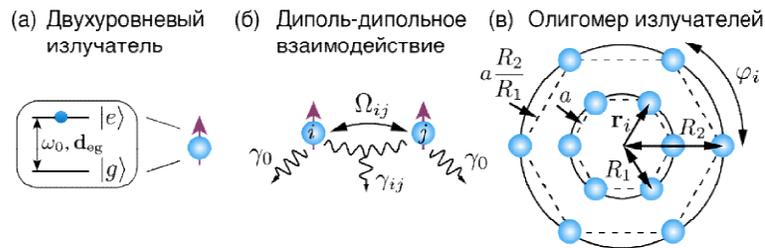


Рис. 1. (а) Квантовый излучатель (атом) может быть представлен как двухуровневая система, имеющая электродипольный переход между основным и возбужденным состояниями, которому соответствует энергия ω_0 и дипольный момент перехода d_{eg} , ориентированный перпендикулярно к плоскости излучателей (вдоль z). (б) Взаимодействие излучателей с вакуумными флуктуациями электромагнитного поля приводит к эффективному диполь-дипольному взаимодействию между ними с когерентным (Ω_{ij}) и диссипативным (γ_{ij}) вкладом. (в) Структура из двух правильных шестиугольников диполей с радиусами R_1

$$\text{и } R_2, \text{ угловая координата } j\text{-ого диполя в шестиугольнике } \varphi_j = \frac{\pi(j-1)}{3}.$$

разного размера. Субрадиационные состояния в двумерной решётке атомов уже использовались для фокусировки излучения на наномасштабе [4], а в структуре типа кольцо для создания нанолазера [5] и более эффективной квантовой памяти [6]. Энергия открытой системы двухуровневых излучателей, как на рис. 1, описывается при по-

мощи эффективного неэрмитового гамильтониана диполь-дипольного взаимодействия (ур. (5) в [6]), собственные состояния которого определяют коллективные моды и комплексный спектр системы, где мнимая часть собственного числа отвечает за коллективный темп эмиссии (обратное время жизни) моды. Поскольку структура на рис. 1 обладает поворотной симметрией, то все состояния, отвечающие случаю одного возбуждения, могут быть разделены по угловому моменту $m = 0, \pm 1, \pm 2, 3$ по аналогии с модами шепчущей галереи кольцевых микрорезонаторов. В зависимости от расстояния между диполями a мы наблюдаем субрадиационные состояния с $m = \pm 1, \pm 2, 3$, а при добавлении диполя в центр – и с $m = 0$, при этом отношение коллективного темпа эмиссии к одиночному $\frac{\gamma}{\gamma_0}$ достигает значений вплоть до 10^{-5} . Мы также предлагаем физический механизм на основе теории связанных мод, объясняющий появление субрадиационных состояний. Состояние с определённым значением момента может быть представлено как суперпозиция двух базисных состояний с таким же моментом, соответствующих независимому возбуждению каждого из колец, деструктивная интерференция между которыми и приводит к формированию долгоживущего одночастичного состояния в системе из двух колец. Также отметим, что одночастичный случай соответствует классической электродинамической задаче, поэтому наши результаты могут быть использованы, например, при создании двумерных резонаторов для нанофотоники с большим фактором Парселла, как это было показано для одномерной цепочки [7].

В этой работе мы также исследуем субрадиационные состояния с двумя возбуждениями в двумерной системе, в то время как подавляющее большинство работ сфокусировано на одномерных системах. Отметим, что многочастичные состояния (с двумя и более возбуждениями) представляют особый интерес в квантовой оптике. Так, например, двухчастичные состояния позволяют создавать на наномасштабе пары сильно коррелированных фотонов, что может быть использовано для квантовых коммуникаций [8]. В нашей системе наблюдаются двухчастичные состояния ($\frac{\gamma}{\gamma_0} \sim 10^{-2}$), соответствующие взаимодействию одночастичных состояний с разным m . Так, например, при $\frac{R_2}{R_1} = 2.2$ и $a = 0.16\lambda_0$ одночастичные состояния с $m = 1$ и $m = 2$ являются первым и вторым долгоживущими, а самое долгоживущее двухчастичное состояние является их суперпозицией, причём темп эмиссии двухчастичного состояния является суммой темпов эмиссий одночастичных состояний.

Подводя итог, мы рассмотрели коллективные одно- и двухчастичные субрадиационные состояния в двумерных ансамблях квантовых излучателей. Была исследована связь появления субрадиационных состояний с геометрическими параметрами системы и предложена модель взаимодействия двух мод для объяснения формирования долгоживущих состояний. Отметим, что данный подход является универсальным и может быть применён для различных геометрий.

Исследование поддержано РФФ №21-72-10107.

Список литературы

1. D. O. de Mello, D. Schöffner, J. Werkmann, et al., Phys. Rev. Lett. 122, 203601 (2019).
2. I. H. Deutsch, PRX Quantum 1, 020101 (2020).
3. R. Dicke, Phys. Rev. 93, 99 (1954).
4. J. Rui, D. Wei, A. Rubio-Abadal, et al., Nature 583, 369-374 (2020).
5. M. Reitz, C. Sommer, C. Genes, PRX Quantum 3, 010201 (2022).
6. A. Asenjo-Garcia, M. Moreno-Cardoner, A. Albrecht, et al., Phys. Rev. X 7 031024 (2021).
7. D. F. Kornov, R. S. Savelev, Y. Kivshar et al., ACS Photonics 8, 3627-3632 (2021).
8. A. S. Sheremet, M. I. Petrov, I. V. Iorsh, et al., arXiv: 2103.06824.

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ SARS-CoV-2 ПРИ ПОМОЩИ ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С ДЕФЕКТНЫМ СЛОЕМ

И. М. Ефимов, Н. А. Ванюшкин*, А. А. Геворгян, С. С. Голик

*Дальневосточный федеральный университет
690022, Российская Федерация, г. Владивосток, остров Русский, п. Аякс, д. 10*

* E-mail: vaniuschkin.nick@ya.ru

Мы предлагаем оптический биосенсор на основе фотонного кристалла с дефектным слоем, который может определять концентрацию SARS-CoV-2 в воде по смещению дефектной моды. В данной работе рассмотрены различные случаи расположения слоев, в частности с зеркальной и без зеркальной симметрии относительно дефекта. Рассмотрена чувствительности биосенсора при различной толщине дефектного слоя.

В последние годы большой интерес представляют биосенсоры, основанные на фотонных кристаллах (ФК), в том числе с дефектом в структуре [1-2]. ФК представляют собой периодическую структуру из слоев с различным коэффициентом преломления. ФК обладают уникальным свойством, заключающееся в наличии определенного диапазона частот, называемый фотонной запрещенной зоной (ФЗЗ), в котором электромагнитная волна не может распространяться через ФК. На практике это означает, что если на ФК падает излучение с длиной волны внутри ФЗЗ, то оно испытывает сильное отражения от ФЗЗ. Таким образом ФК может выполнять роль зеркала или оптического фильтра. В случае добавления в периодическую структуру ФК дефектного слоя нарушается периодичность структуры, что приводит изменению спектров пропускания и отражения во всей области. В частности, это проявляется в появлении узкой полосы пропускания внутри ФЗЗ, которая называется дефектной модой (ДМ). Положение и форма ДМ зависит от параметров дефектного слоя, таких как толщина и коэффициент преломления дефектного слоя. Именно это свойство лежит в основе датчиков с дефектным ФК. Нами была разработана модель оптического биосенсора, основанного на ФК с дефектом, способная определять концентрацию патогена в воде. На рисунке 1 представлена структура ФК в поперечном разрезе.

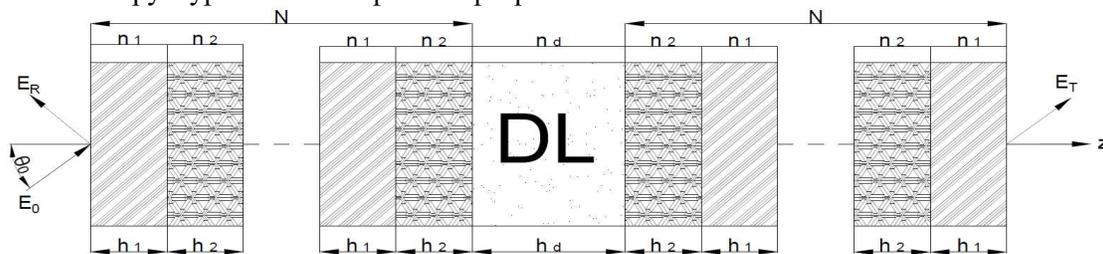


Рис. 1. Рассматриваемая структура

E_R – Отраженная волна	E_0 – Падающая волна	N – Кол-во ячеек
E_T – Пропускаемая волна	θ_0 – Угол падения	DL – Дефектный слой
n_j – Показатель преломления j-ого слоя		h_j – Толщина j-ого слоя

Наша структура состоит из дефектного слоя, находящегося между двумя идеальными ФК, каждый из которых состоит из N периодических ячеек. Каждая ячейка представляет собой пару слоев, имеющих толщину h_j и показатель преломления n_j . Коэффициенты преломления определялись материалами слоев. В нашей структуре для идеальных ФК использовались TiO_2 ($j = 1$), SiO_2 ($j = 2$), в качестве дефекта использована H_2O с патогеном SARS-CoV-2.

В предыдущей работе [3] был рассмотрен случай периодической структуры без зеркальной симметрии, в данной работе будет рассмотрен случай структуры с зеркальной симметрией слоев ФК. Зеркальная симметрия достигается путём добавления в строго периодическую структуру дополнительного слоя с показателем преломления n_2 в центре ФК, который также играет роль дефекта. По этой причине, в спектре зеркально симметричного

ФК присутствует дефектная мода даже в отсутствие дополнительного дефектного слоя с водой. Для моделирования такой структуры был использован матричный метод расчета спектров отражения, который был подробно разобран в работе [3]. Рассмотрим спектры отражения: на рис. 2а показаны спектр отражения с зеркальной симметрией с дефектным слоем, на рис. 2б показана зависимость показателя преломления по длине ФК. Дефектная мода (ДМ) на рис. 2а, указана черной стрелкой.

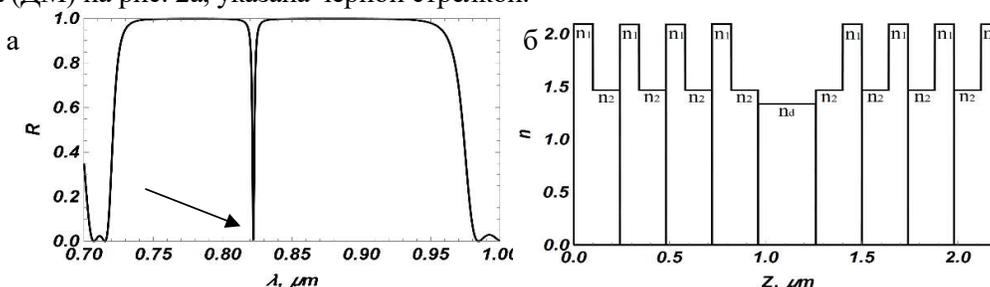


Рис. 2. (а) Спектр отражения с дефектным слоем, (б) зависимость показателя преломления по длине ФК при следующих параметрах $h_1 = 0.14$ мкм, $h_2 = 0.10$ мкм, $h_d = 0,3$ мкм, $N = 4$, $\theta_0 = 0$. ФК граничит с обеих сторон с воздухом ($n = 1$).

На рис. 3а, 3б представлены графики зависимости чувствительности датчика при изменении толщины дефектного слоя, для случая зеркальной симметрии и без зеркальной симметрии соответственно. Подробности вычисления чувствительности приведены в работе [3].

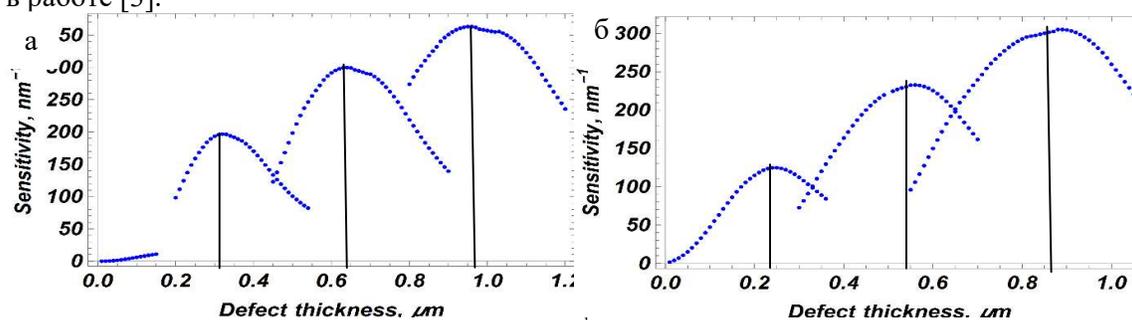


Рис. 3. Зависимость чувствительности (nm^{-1}) оптического биосенсора от толщины дефекта (а) с зеркальной симметрии, (б) без зеркальной симметрии

На рис. 3а и 3б представлены чувствительности трех мод. Черными линиями отмечены значения чувствительности, когда ДМ оказывается в центре ФЗЗ. Данные носят общий характер и применимы для любого ФК с дефектом в структуре. Как можно заметить, чувствительность достигает максимума вблизи центра ФЗЗ. На серии рисунков видно, что с ростом номера моды общая чувствительность сенсора возрастает, однако скорость возрастания снижается. Для сравнения эффективности двух структур приведем численные значения чувствительности третьей ДМ: 364 nm^{-1} для случая с зеркальной симметрией, 305 nm^{-1} для случая без зеркальной симметрии. Таким образом, можно сделать вывод, что более оптимально использовать структуру с зеркальной симметрией.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZNS-2020-0003 № 0657-2020-0003).

Список литературы

1. Diffraction Optics of Complex-Structured Periodic Media / ed. V.A. Belyakov. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 263 p., 2019.
2. D. Li, H. Zhou, X. Hui, et. al., Plasmonic Biosensor Augmented by a Genetic Algorithm for UltraRapid, Label-Free, and Multi-Functional Detection of COVID-19 // J. Anal. Chem., vol. 93 (27), pp. 9437-9444, 2021.
3. I.M. Efimov, N.A. Vanyushkin, A.A. Gevorgyan, et.al. Optical biosensor based on a photonic crystal with a defective layer designed to determine the concentration of SARS-CoV-2 in water // Physica Scripta, vol. 97 (5), pp. 055506, 2022.

ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ СВЕТА В ЧИРПИРОВАННЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Н. А. Ванюшкин*, А. А. Геворгян, С. С. Голик

*Дальневосточный федеральный университет
690022, Российская Федерация, г. Владивосток, остров Русский, п. Аякс, д. 10
E-mail: vaniuschkin.nick@ya.ru

Исследованы особенности локализации света в 1D линейно chirпированных фотонных кристаллах. Также были изучены особенности спектров фотонной плотности состояний (ФПС), и было проведено их сравнение со спектрами плотности локализованной световой энергии при различных законах chirпирования. В фотонной запрещённой зоне (ФЗЗ) ФПС имеет эквидистантные пики, что указывает на возможное возбуждение связанных мод в ФЗЗ. Однако, как было показано при сравнении спектров ФПС и плотности световой энергии, не все связанные моды возбуждаются внутри ФЗЗ.

Фотонные кристаллы (ФК) с градиентными параметрами интересны как с точки зрения практических применений, таких как оптические фильтры, «всенаправленные» диэлектрические зеркала, стретчеры (растягиватели) оптических импульсов, так и с точки зрения наблюдения интересных физических эффектов, включающих, например, блоховские осцилляции и зерновое туннелирование света [1]. Кроме того, так называемые chirпированные ФК (ФК с градиентом периода модуляции показателя преломления) отличаются существенно более широкой фотонной запрещённой зоной (ФЗЗ) по сравнению со строго периодическими ФК с тем же оптическим контрастом. В данной работе мы исследовали особенности локализации света в одномерных chirпированных гармонических ФК.

Для этого было рассмотрено отражение и пропускание света через 1D слой ФК с диэлектрической проницаемостью, имеющей вид:

$$\varepsilon(z) = \varepsilon + \Delta\varepsilon \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda(z)}z\right). \quad (1)$$

Ниже будет приведено сравнение оптических свойств линейно chirпированных ФК первого типа $\left(\Lambda(z) = \frac{\Lambda_{max}-\Lambda_{min}}{d}z + \Lambda_{min}\right)$ и второго типа $\left(\Lambda(z) = \frac{\Lambda_{min}-\Lambda_{max}}{d}z + \Lambda_{max}\right)$, где d – толщина слоя ФК. При вычислении коэффициентов отражения, пропускания и распределения поля внутри ФК была использована теория, разработанная в [2].

На рис. 1а показана спектральная зависимость распределения света внутри слоя ФК в случае отсутствия chirпирования. Как видно из рисунка, значительная локализация света происходит в краевых модах (моды, ближайšie к ФЗЗ с обеих сторон с отражением, в общем случае равным нулю), в то время как внутри ФЗЗ (от 1140 нм до 1270 нм) падающая волна быстро затухает.

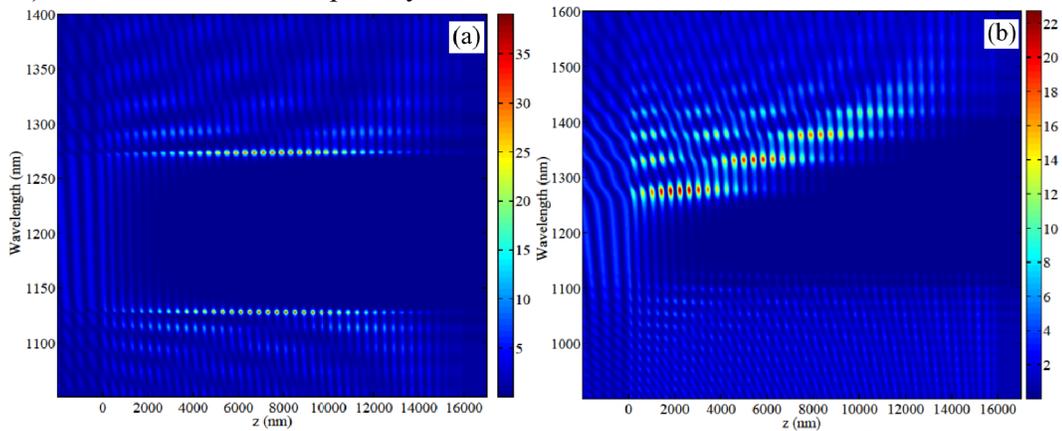


Рис. 1. Спектральная зависимость распределения интенсивности света $I(z) = |E_{in}(z)|^2$ в случае строго периодической структуры с периодом $\Lambda = 400$ нм (а) и chirпированного ФК первого типа (б). Структуры имели следующие параметры: $\varepsilon = 2.25$, $\Delta\varepsilon = 0.5$, $d = 16$ мкм, $\Lambda_{min} = 380$ нм, $\Lambda_{max} = 420$ нм, показатель преломления внешней среды $n_s = 1$.

На Рис. 1b представлен аналогичный график для слоя ФК в случае первого типа чирпирования, на котором видно, что в ФЗЗ (простирающейся от 1100 нм до 1420 нм) существуют связанные моды, обусловленные блоховскими осцилляциями в чирпированных кристаллах, где происходит сильная локализация света. Таким образом, в чирпированных ФК в отличие от ФК с идеальной периодической структурой возбуждаются два типа мод – краевые и связанные.

Перейдем теперь к исследованию особенностей спектров локализованной в слое ФК плотности световой энергии для чирпированных ФК первого и второго типа. Плотность световой энергии в слое ФК будем рассчитывать по следующей формуле:

$$w = \frac{1}{d} \int_0^d |E_{in}(z)|^2 dz, \quad (2)$$

Для сравнения рассчитаем также нормированную фотонную плотность состояний (ФПС) по следующей формуле [3]:

$$\frac{\rho}{\rho_{iso}} = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{dk}{d\lambda} = -\frac{\lambda^2}{2\pi d} \frac{v \frac{du}{d\lambda} - u \frac{dv}{d\lambda}}{u^2 + v^2}. \quad (3)$$

Здесь $\rho_{iso} = 1/c$ – ФПС вакуума, где c – скорость света в вакууме, u и v – действительная и мнимая части амплитуды прошедшей волны.

На рис. 2 показаны спектры отражения R , плотности световой энергии w и нормированной ФПС ρ/ρ_{iso} для ФК с чирпированием первого типа и для ФК с чирпированием второго типа. Как видно из рис. 2 величина ρ/ρ_{iso} имеет эквидистантные пики внутри ФЗЗ, что указывает на возможное возбуждение связанных мод в ФЗЗ. Также видно, что пики w совпадают с пиками ρ/ρ_{iso} , однако возбуждаются не все связанные моды: при первом типе чирпирования возбуждаются длинноволновые связанные моды, а при втором типе чирпирования – коротковолновые.

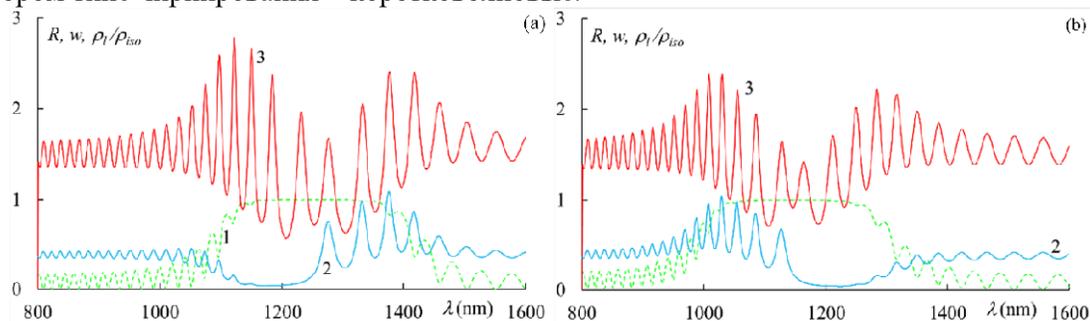


Рис. 2. Спектры отражения R (кривая 1), плотности локализации световой энергии w (кривая 2) и нормированной ФПС ρ/ρ_{iso} для чирпированного ФК первого типа (a) и второго типа (c). Все параметры, как на Рис. 1.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZNS-2020-0003 № 0657-2020-0003).

Список литературы

1. S. Longhi, Optical Bloch Oscillations and Zener Tunneling with Nonclassical Light // Phys. Rev. Lett., vol. 101, p. 193902, 2008.
2. D. M. Sedrakian, A. H. Gevorgyan, A. Zh Khachatryan, Reflection of a plane electromagnetic wave obliquely incident on a one-dimensional isotropic dielectric medium with an arbitrary refractive index // Opt. Commun. vol. 192, pp. 135-143, 2001.
3. J. P. Dowling, Dipole Emission in Finite Photonic Bandgap Structures: An Exactly Solvable One-Dimensional Model // J. Lightwave Technol. vol 17, p. 2142, 19

Секция 4

БИОФОТОНИКА

СПЕКТРОСКОПИЯ КРОВИ ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ГЛИОМ

О. П. Черкасова^{1,2*}, М. Р. Конникова^{3,4}, А. А. Манькова³, Д. А. Вражнов^{5,6}, А. И. Князькова^{5,6}
Ю. В. Кистенев⁶, А. П. Шкуринов^{3,4}

¹Институт лазерной физики СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 15Б
*E-mail: o.p.cherkasova@gmail.com

²Новосибирский технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. К. Маркса, д. 20

³Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

⁴Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал ФИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

140700, Российская Федерация, Московская обл., Шатура, ул. Святоозерская, д. 1

⁵Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
634055, Российская Федерация, Томск, пл. Академика Зуева, д. 1

⁶Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 36

Ранняя диагностика онкологических заболеваний может быть достигнута при анализе сыворотки или плазмы крови спектральными методами. В работе исследовали сыворотку крови мышей в динамике развития U87 глиобластомы с помощью терагерцовой (ТГц) и инфракрасной (ИК) спектроскопии, а также спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света. Показаны возможности каждого метода для дифференциации стадии развития глиомы. Методами машинного обучения были определены наиболее информативные частоты, связанные с молекулярными маркерами глиомы, и выявлены критерии для ранней диагностики.

Отмечающийся во всем мире рост числа онкологических заболеваний ставит вопрос о развитии новых методов ранней диагностики и возможности неинвазивного контроля лечения. Диагностика онкологических заболеваний может быть достигнута при анализе жидкостей организма спектральными методами [1-3]. Так, нами ранее было показано применение метода ТГц импульсной спектроскопии для исследования сыворотки крови при экспериментальном раке печени [4] и для выявления злокачественных заболеваний щитовидной железы по анализу плазмы крови пациентов [5]. Данная работа выполнена в динамике развития экспериментальной глиобластомы человека (модель ортотопической ксенотрансплантации клеток глиобластомы человека U87 мышам иммунодефицитной линии SCID) [6]. Магнитно-резонансная спектроскопия использовалась для определения молекулярных маркеров глиомы на разных стадиях развития опухоли [7]. В работе были изучены ТГц, ИК и КР спектры сыворотки крови через 7, 14, 21 и 28 дней после введения суспензии опухолевых клеток глиобластомы человека U87. Животным из контрольной группы вводили 5 мкл культуральной среды. В каждой группе было по 10 мышей. Эксперименты были выполнены с соблюдением принципов гуманности в соответствии с директивой Европейского сообщества (86/609/ЕЕС).

Методы машинного обучения были использованы для оценки делимости контрольных и экспериментальных групп. Предложен двухэтапный алгоритм анализа спектров для выделения информативных частот, связанных с молекулярными маркерами глиомы. Первый этап был основан на методе главных компонент для уменьшения размерности данных и вклада шумов. Второй этап включал использование машины опорных векторов с линейным ядром для разделения групп.

ТГц спектры поглощения сыворотки крови исследовали по методике, описанной в статьях [4, 5]. Показано уменьшение поглощения сыворотки крови мышей в динамике развития глиомы. Анализ параметров комплексной диэлектрической проницаемости сыворотки крови свидетельствует об увеличении доли связанной воды при возрастании размеров опухоли. Методами машинного обучения были определены информативные частоты для каждой недели эксперимента.

Исследования ИК спектров проводили с использованием ИК-Фурье-спектрометра в конфигурации нарушенного полного внутреннего отражения в диапазоне 350–4000 см⁻¹. Показано, что наибольшую амплитуду поглощения интенсивных полос (1500–1700 см⁻¹ и 3000–3400 см⁻¹) имеет ИК спектр контрольной группы, а наименьшую – через 28 дней после введения клеток U87 глиобластомы. Методами машинного обучения выявлено, что наиболее значимыми частотами для дифференциации стадий глиомы являются 1050, 1550, 1650, 1700 см⁻¹.

Исследования КР спектров проводили по методике, описанной в статьях [2, 8]. Наиболее существенные изменения спектров КР наблюдаются в диапазоне 900–1700 см⁻¹. Проведен анализ матриц нагрузки и определены наиболее информативные частоты, связанные с конкретными метаболитами, концентрация которых изменяется в крови в динамике опухолевого роста.

Таким образом, показана возможность использования ТГц, ИК и КР спектральных данных анализа сыворотки крови для дифференциации стадий глиомы и построения прогнозных моделей, позволяющих различать группы животных с U87 глиобластомой и здоровых. Для выделения информативных признаков предложен конвейер машинного обучения, показавший хорошие результаты (показатели чувствительности, специфичности, точности более 90%).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-52-55004), Междисциплинарной научно-образовательной школой Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина», Правительством Российской Федерации по поддержке научно-исследовательских проектов, реализуемых под руководством ведущих ученых в вузах России (соглашение № 075-15-2021-615 от 4 июня 2021), Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Список литературы

1. A.G. Theakstone, P.M. Brennan, M.D. Jenkinson, et al., Rapid Spectroscopic Liquid Biopsy for the Universal Detection of Brain Tumours // *Cancers*, vol. 13, pp. 3851, 2021.
2. O. Cherkasova, A. Mankova, D. Vrazhnov, Raman spectroscopy of blood plasma for cancer diagnosis // *Proc. SPIE 12086, XV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications*, vol. 12086, pp. 120861M-1 – 12086M-7, 2021.
3. O. Cherkasova, Y. Peng, M. Konnikova, et al., Diagnosis of Glioma Molecular Markers by Terahertz Technologies // *Photonics*, vol. 8 (1), pp. 22, 2021.
4. М.М. Назаров, О.П. Черкасова, Е.Н. Лазарева и др., Комплексное изучение особенностей поглощения сыворотки крови крыс с экспериментальным раком печени // *Оптика и спектроскопия*, т. 126 (6), с. 799-808, 2019.
5. M. R. Konnikova, O.P. Cherkasova, M.M. Nazarov, et al., Malignant and benign thyroid nodule differentiation through the analysis of blood plasma with terahertz spectroscopy // *Biomed. Opt. Express*, vol. 12 (2), pp. 1020-1035, 2021.
6. E.L. Zavjalov, I.A. Razumov, L.A. Gerlinskaya, A.V. Romashchenko, In vivo MRI visualization of U87 glioblastoma development dynamics in the model of orthotopic xenotransplantation to the SCID mouse // *Russ. J. Genet. Appl. Res.*, vol. 6 (4), pp. 448–453, 2016.
7. O.V. Shevelev, A.A. Seryapina, E.L. Zavjalov, et al., Hypotensive and neurometabolic effects of intragastric Reishi (*Ganoderma lucidum*) administration in hypertensive ISIAH rat strain // *Phytomedicine*, vol. 41, pp. 1-6, 2018.
8. А.А. Манькова, О.П. Черкасова, Е.Н. Лазарева и др. Исследование сыворотки крови у крыс с трансплантированной холангиокарциномой с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света // *Оптика и спектроскопия*, т. 129 (1), с. 956-963, 2020.

МЕДИЦИНСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО ИМИДЖИНГА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Ю. В. Кистенев

*Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр.Ленина 36
E-mail: yuk@iao.ru*

Эффективность диагностики с помощью лазерного молекулярного имиджинга определяется успешностью выявления профиля информативных молекулярных маркеров, специфичных для целевого заболевания. Методы машинного обучения позволяют извлекать информативные признаки из экспериментальных данных. В докладе будут представлены примеры использования методов ИК и терагерцового молекулярного имиджинга и машинного обучения для диагностики онкологических заболеваний.

Раннее выявление новообразований является одной из актуальных тем в медицине. Проблема связана с гетерогенностью злокачественной опухоли, сильным влиянием микроокружения, широкой вариабельностью онкогенеза.

Молекулярный имиджинг позволяет проводить идентификацию и количественный анализ профиля молекулярных маркеров в ткани без хирургической биопсии [1, 2].

Методы оптической визуализации, способные неинвазивно отслеживать метаболические и морфологические изменения в тканях, включают конфокальную микроскопию, микроспектроскопию комбинационного рассеяния флуоресцентную микроскопию, флуоресцентную визуализацию с разрешением во времени, терагерцовую спектроскопию и др.[3].

Зависимости между профилем молекулярных биомаркеров и состоянием человека, как правило, неинвестны. Методы математической статистики не всегда эффективны для нахождения скрытых связей в медицинских данных. Первая причина – высокие вычислительные затраты из-за необходимости нахождения корреляции между большим количеством переменных. Во-вторых, эти связи, как правило, нелинейны.

Методы машинного обучения позволяют находить информативные признаки в исходных данных и создавать предиктивные модели для классификации новых данных [4].

Мы планируем обсудить подходы и примеры применения лазерного молекулярного ИК и терагерцового имиджинга и спектроскопии в комбинации с машинным обучением для детекции онкологических заболеваний.

Исследования выполнены при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2021-615 от 04.06.2021 г.).

Список литературы

1. Д.А. Манкофф, J. Nucl. Med. 48, 2007.
2. М. А. Пиш и др. Клини. Радиол. 65(7), 500–516, 2010.
3. А. Ward и др., PLoS ONE 8 (2), 2013.
4. К. Керстинг, Frontiers, 2018. DOI: 10.3389/fdata.2018.00006

ПОЛИФЕРМЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ В БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОМ АНАЛИЗЕ

В. А. Кратасюк

Сибирский федеральный университет
660041, Российская Федерация, Красноярск, Свободный проспект, 79
E-mail: valkrat@mail.ru

Обзор посвящен новому направлению в биофотонике – ферментативным биолюминесцентным биотестам, их конструированию и использованию в экологическом и других видах экспрессного мониторинга.

Исторически применение биолюминесценции в токсикологии началось с использования светящихся бактерий, и они до сих пор широко используются. В отличие от классических тестируемых объектов, таких как парameции, водоросли, дафнии и т. п., анализ в биотестах на светящихся бактериях происходит быстрее (<30 мин.). Однако, как и в случае других организмов, светящиеся бактерии имеет много недостатков, связанных с использованием живых объектов. Так, трудности поддерживать стабильное состояние бактериальной культуры во время измерений и при хранении приводят к низкой точности измерения. При этом реакция бактерий на токсичные вещества неоднозначна и выражается как в уменьшении, так и в увеличении интенсивности светоизлучения, что часто приводит к неоднозначной интерпретации результатов. Из-за этих недостатков биотест на светящихся бактериях также не дает надежных результатов. Для решения проблем ферментативного анализа и биотестирования предлагается новый подход к разработке ферментативных биосенсоров, а также биотестов на токсичность. В противовес методам химического анализа, которые занимаются поиском в окружающей среде известных загрязнителей и токсичных веществ и сравнивают их концентрацию с ПДК, предлагаются методы ферментативного биотестирования, позволяющие решить проблему обнаружения неизвестных многочисленных химических соединений в окружающей среде, пищевых продуктах и других объектах. Ферментативные биотесты дают интегральную оценку качества или загрязнения анализируемой среды и, также же как классические биотесты, показывают влияние вредных веществ на функции живых организмов (рыбы, водоросли, растения, дафнии, бактерии и т. д.), но в качестве тест объекта используют ферментативные реакции, отвечающие за биологические функции, например, дыхание, подвижность и т. д. Предложена новая методология комплексного ферментативного биотеста, предусматривающая замену живых организмов, используемых в качестве тест-систем в биотестах, на набор репрезентативных ферментативных систем, составляющих комплексный ферментативный биотест. Каждая из ферментативных систем моделирует, как правило, одну ключевую функцию организма. Выявлены принципы выбора ферментных систем, адекватных задачам исследования. Определены составы такого теста для исследования загрязнения городских и сельскохозяйственных почв, на основе специфического действия токсиантов на ферменты. Была разработана методология получения иммобилизованных реагентов «Энзимолум», содержащих в своем составе ферменты и их субстраты для проведения одного измерения, по сути являющихся биологическим модулем биосенсора. Предлагаемые подходы обеспечивают ферментативным биотестам ценовые преимущества, универсальность, высокую чувствительность и точность, быстрый отклик, а реагенты обладают стабильностью и увеличенным сроком хранения. Была разработана экспериментальная ферментативная модель организма (ФМО) как новый комплексный биотест для оценки качества почвы. ФМО используется также для мониторинга природных и промышленных водных экосистем, загрязнения воздуха, а также для анализа качества пищевых продуктов, разнообразных материалов, включая наноматериалы.

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МИКРОРЕОЛОГИИ КРОВИ

А. Луговцов^{1*}, Е. Ширшин¹, П. Ермолинский¹, Ч.-Л. Ченг², А. Приезжев¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, Россия, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 62

*E-mail: anlug@biomedphotonics.ru

²Национальный университет Донг Хва
974301, Тайвань, Хуалянь, Шоуфенг, 1-2

Обсуждаются физические основы современных оптических методов для изучения взаимодействия наночастиц с эритроцитами крыс и человека, а также изменения микрореологических параметров крови при ее взаимодействии с наночастицами.

В последнее время предложено использовать различные типы наночастиц (НЧ) для применения в различных биомедицинских целях, а также пищевой промышленности [1]. Предполагается, что такие частицы биосовместимы и безопасны для организма. В частности, для биомедицинской визуализации и фотодинамической терапии, прямой доставке лекарств и др. можно использовать НЧ оксида железа (Fe_2O_3) и углеродные НЧ – нанодIAMазы (ND), диоксид титана (TiO_2) и кремниевые НЧ, нанотрубки и фуллерены [1]. Предполагается, что для достижения поставленной цели НЧ вводятся в кровь внутривенно. НЧ могут влиять на свойства клеток крови, в частности на такие свойства эритроцитов, как их способность к обратимой агрегации и деформации в сдвиговом потоке при движении по кровеносным сосудам и капиллярам. Эти изменения могут нарушать реологию крови и, как следствие, повышать риск развития сердечно-сосудистых заболеваний и даже смертности.

В докладе обсуждаются физические основы современных оптических методов – лазерной дифрактометрии, агрегометрии, диффузного рассеяния света, а также методов оптического захвата и флуоресцентной микроскопии – для изучения различных аспектов взаимодействия НЧ с эритроцитами крыс и человека [2]. Показано влияние НЧ на микрореологию крови *in vitro* и *in vivo*, а именно на агрегационные и деформационные свойства эритроцитов человека и крыс. Инкубация крови с НЧ при больших концентрациях негативно влияет на агрегацию и деформируемость клеток, причем эффект зависит от концентрации, размера и поверхностной функционализации НЧ. Изменения микрореологических параметров более выражены при больших концентрациях НЧ и нефункционализированных поверхностях частиц. Аналогично и влияние на микрореологические свойства крови НЧ, инкубированных с кровью (*in vitro*), и введенных внутривенно лабораторным животным (*in vivo*). На основании полученных результатов можно сделать вывод, что НЧ могут быть введены в кровь в низких концентрациях (33 мкг/мл) без существенного ухудшения микрореологических параметров крови. Однако при определенных условиях влияние НЧ может быть значительным, поэтому необходимо проверять гемосовместимость каждого типа наночастиц *in vitro* перед их использованием.

Выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ № 20-45-08004 и в рамках НОШ "Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина".

Список литературы

1. M.L. Etheridge et al., "The big picture on nanomedicine: the state of investigational and approved nanomedicine products," *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 9, 1–14, 2013.
2. A. E. Lugovtsov et al., "Optical assessment of alterations of microrheologic and microcirculation parameters in cardiovascular diseases," *Biomedical Optics Express*, 10(8):3974–3986, 2019.

НОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСИБИЛИЗАТОРЫ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСОВ АЗА-ДИПИРРОМЕТЕНОВ ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

Е. Н. Бочарникова^{1*}, Ю. В. Аксенова¹, М. В. Ашмарина¹, М. Б. Березин²

¹*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 36*

*E-mail: bocharnikova.2010@mail.ru

²*Институт химии растворов имени Г.А. Крестова РАН
153045, Российская Федерация, Иваново, ул. Академическая, д. 1*

В докладе представлены результаты экспериментального исследования спектроскопических и фотосенсибилизационных свойств ряда галогензамещенных борфторидных аза-дипиррометеновых комплексов. Изученные соединения можно рекомендовать в качестве среды для эффективной генерации синглетного кислорода, что перспективно для применения в медицине, в качестве фотосенсибилизатора для фотодинамической терапии.

Разработка лекарственных препаратов и других биологически активных средств на основе сложных органических молекул является одним из перспективных прикладных направлений в проблеме использования дипиррометеновых комплексов. Одним из таких перспективных направлений является использование дипиррометенов в фотодинамической терапии для лечения онкологических заболеваний. Эта прогрессивная методика в последние годы получила распространение, во-первых, благодаря разработке специальных мягких лазеров, с помощью которых можно проводить терапию, не нагревая ткани, во-вторых, благодаря созданию фотосенсибилизаторов – препаратов способных накапливаться в патологически измененных клетках (точнее в их мембранах) и интенсивно выделять синглетный кислород под действием лазерного света.

Существующие агенты для фотодинамической терапии на основе порфиринов проникают в пораженные ткани лишь на несколько миллиметров, следовательно, подходят только для поверхностно локализованных опухолей или требуют эндоскопического вмешательства. Кроме того, данные соединения требуют длительного лазерного облучения, что часто приводит к их фоторазрушению и осложнениям при лечении. Использование комплексов аза-дипиррометенов в качестве фотосенсибилизаторов позволит избежать указанных недостатков благодаря их уникальным оптическим свойствам (достаточно высокие коэффициенты экстинкции в длинноволновой области для более глубокого проникновения в ткани, хорошая излучательная способность и фотостабильность).

Экспериментально были изучены спектроскопические и фотосенсибилизационные характеристики ряда галогенпроизводных борфторидных аза-дипиррометеновых комплексов. Показано, что введение различных заместителей (чаще всего галогеновых) в структуру комплексов позволяет получить долгоживущее излучение триплетных состояний, что необходимо для дальнейшего взаимодействия с молекулами кислорода. На основе полученных данных показано, что аза-дипиррометеновые борфторидные комплексы эффективно генерируют синглетный кислород при возбуждении в области 640 нм. Значения квантовых выходов $^1\text{O}_2$ превосходят известный для данной спектральной области фотосенсибилизатор Метиленовый Синий. Полученные результаты указывают на возможность создания новых фотосенсибилизаторов на основе комплексов дипиррометенов для фотодинамической терапии и фотокатализа химических реакций окисления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-73-00073.

ОПТИЧЕСКИЙ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ НАНОСЕНСОР ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК

Г. Н. Чугреева^{1*}, О. Э. Сарманова¹, К. А. Лаптинский², С. А. Буриков¹, Т. А. Доленко¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Физический факультет
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1с2

*E-mail: chugreeva.gn17@physics.msu.ru

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
НИИЯФ им.Д.В.Скобелева
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1с2

Работа посвящена разработке оптического наносенсора на основе углеродных точек для определения концентрации ионов Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} и значения pH в жидких средах. Применение нейросетевого подхода для измерения концентрации ионов тяжелых металлов и значения pH в водных суспензиях с помощью спектров оптического поглощения и флуоресценции углеродных точек обеспечило одновременное определение искомых величин с удовлетворительной точностью.

Развитые тяжелая промышленность, металлургия, сельское хозяйство и т. д. – глобальные источники загрязнения окружающей среды соединениями тяжелых металлов, накапливающихся в поверхностных и подземных водах, почве и в живых организмах [1]. Поэтому мониторинг содержания токсичных веществ в жидких средах становится все более очевидной необходимостью. Углеродные точки (УТ) имеют широкие перспективы для использования в качестве оптических наносенсоров в задачах диагностики многокомпонентных сред. В отличие от полупроводниковых квантовых точек, органических флуоресцентных красителей и металлических наночастиц, УТ являются биосовместимыми и водорастворимыми [2]. Во всех известных нам работах (например, [3, 4]) УТ рассматривались как унимодальные наносенсоры (т. е. наносенсоры какого-либо одного вещества), которые нельзя использовать для мониторинга одновременно нескольких параметров окружающей среды. В то же время в большинстве прикладных задач (например, в медицине или в различных технологических процессах) требуется высокоточный мониторинг одновременно нескольких параметров окружающей среды, где каждый компонент может влиять на оптические свойства водных суспензий УТ.

В настоящей работе предложен подход к созданию оптического мультимодального наносенсора на основе УТ для одновременного измерения концентрации ионов тяжелых металлов (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+}) и значения pH водных сред.

Гидротермальным методом были синтезированы УТ размером 30 нм, обладающие стабильной и интенсивной флуоресценцией. Экспериментально было установлено, что флуоресценция синтезированных УТ является чувствительной к изменениям концентраций катионов Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} в воде. Был получен набор данных, состоящий из 1000 спектров оптического поглощения и 1000 спектров флуоресценции водных суспензий углеродных точек в присутствии одного, двух и трех типов катионов. Спектры флуоресценции регистрировались с помощью спектрофлуориметра Shimadzu RF-6000 при возбуждении излучением с длиной волны 350 нм в диапазоне от 200 до 750 нм с шагом 1 нм. Спектры оптического поглощения были получены с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-1800 в диапазоне от 190 до 1100 нм с шагом 1 нм. Концентрация катионов варьировалась в диапазоне 0–4.95 мМ с шагом 0.55 мМ. Для каждой исследованной суспензии был измерен водородный показатель pH.

Для решения обратной задачи оптической спектроскопии – одновременного измерения концентрации катионов тяжелых металлов и значения pH в водных суспензиях УТ – в данной работе применялись искусственные нейронные сети (ИНС).

Исходный набор данных состоял из 1000 примеров спектров флуоресценции и 1000 примеров спектров оптического поглощения (Рис. 1). Для тренировки ИНС, предотвращения их переобучения и оценки результатов работы алгоритмов исходный набор данных был случайным образом разбит на тренировочный, валидационный и тестовый наборы в соотношении 70:20:10, соответственно.

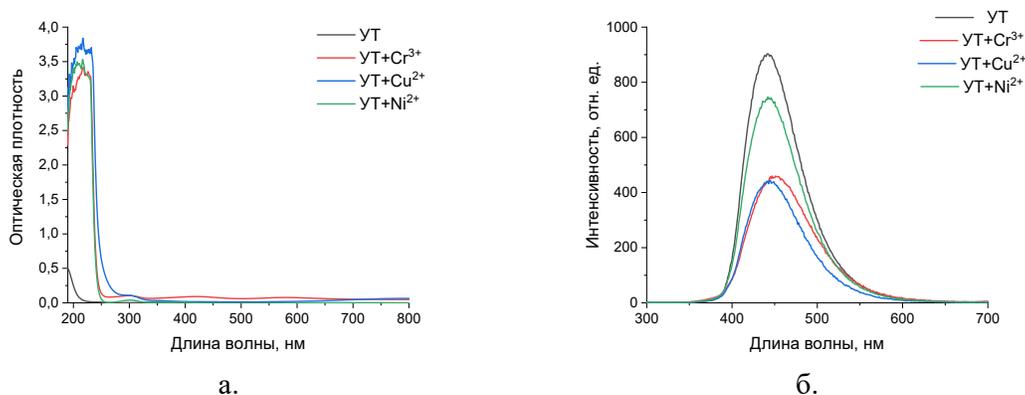


Рис.1. Спектры оптической плотности (а) и флуоресценции водных суспензий углеродных точек в присутствии выбранных катионов. Концентрация катионов 4.95 мМ.

Были выбраны многослойные перцептроны, содержащие 1, 2 и 3 скрытых слоя. Для предотвращения переобучения ИНС в качестве критерия останова использовалось отсутствие снижения ошибки на валидационном наборе в течение 500 эпох обучения на тренировочном наборе. В каждом рассматриваемом случае (для каждой архитектуры ИНС) тренировались 3 нейронные сети, чтобы нивелировать влияние случайной начальной инициализации весов. Статистические показатели решения задачи для всех трех сетей в каждом конкретном случае усреднялись.

В работе приводятся результаты применения ИНС к спектрам флуоресценции и оптического поглощения водных суспензий УТ. Применение нейросетевого подхода для измерения концентрации ионов тяжелых металлов и значения рН в водных суспензиях с помощью спектров оптического поглощения и флуоресценции УТ обеспечило одновременное определения катионов тяжелых металлов Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} со средней ошибкой 0.28 ± 0.03 мМ, 0.79 ± 0.04 мМ, 0.24 ± 0.02 мМ соответственно.

Потенциально количество параметров обратной задачи оптической спектроскопии может быть увеличено, в то время как в большинстве публикаций количество целевых параметров не превышает двух.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00138, <https://rscf.ru/project/22-12-00138/>. Работа Г.Н.Чугреевой (обработка спектров поглощения и флуоресценции) поддержана Фондом содействия развитию теоретической физики и математики «БАЗИС» (проект № 21-2-9-25-1).

Список литературы

1. Morais, S., e Costa, F. G., Lourdes Pereir, M. de. Heavy Metals and Human Health. In Environmental Health – Emerging Issues and Practice // InTech, 2012.
2. Baker, S. N., & Baker, G. A. Luminescent Carbon Nanodots: Emergent Nanolights // Angewandte Chemie International Edition, v. 49 (38), pp. 6726–6744, 2010.
3. Guo, Y., Wang, Z., Shao, H., & Jiang, X. Hydrothermal synthesis of highly fluorescent carbon nanoparticles from sodium citrate and their use for the detection of mercury ions // Carbon, v.52, pp.583–589, 2013.
4. Salinas-Castillo, A., Ariza-Avidad, M., Pritz, C., et.al. Carbon dots for copper detection with down and upconversion fluorescent properties as excitation sources // Chemical Communications, v.49(11), p.1103, 2013.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

А. Ю. Дубовик*, А. А. Матюшкина, М. С. Степанова, В. В. Захаров, А. О. Орлова

Университет ИТМО

197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49А

**E-mail: adubavik@itmo.ru*

Гибридные материалы с использованием коллоидных наночастиц представляют большой интерес в последние десятилетия. Это перспективные материалы для различных применений в фундаментальных исследованиях, нанофотонике, биологии и медицине. Магнитно-люминесцентные композиты на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ) и суперпарамагнитных наночастиц оксида железа (SPIONs) могут служить платформой, сочетающей визуализацию и терапию.

Развитие нанотехнологий позволяет использовать различные материалы для создания наноразмерных структур. Наноструктуры находят все большее применение в различных областях, включая биологию и медицину, формируя новую область исследований – наномедицину [1]. Она предполагает использование наночастиц (1-100 нм) для отслеживания поведения меченых клеток, в частности опухолевых, а также для проведения целенаправленной терапии или комбинации обоих методов ("тераностика") [2]. Для этих целей, в зависимости от конкретной задачи, наночастицы могут быть технологически разработаны и модифицированы таким образом, чтобы одновременно содержать компоненты для визуализации и воздействовать на трансформированные клетки, приводя к их гибели, например, в результате гипертермии.

Предложен одноэтапный подход к получению магнитно-люминесцентного нанокомпозита (МЛНК), в котором использовались прекурсоры для получения углеродных точек (С-КТ) и нанокристаллов Fe_3O_4 . Используя этот подход, мы синтезировали магнитные люминесцентные углеродные точки. В процессе синтеза образовалась углеродная матрица с люминофорами, а размер конечных нанокомпозитов составил около 60 нм, что является важным параметром, например, для проникновения в ядра клеток [3].

В нашей работе мы использовали термометрию на основе времени жизни флуоресценции для оценки температур, достигнутых внутри клетки в результате лазерно-индуцированного нагрева золотых наностержней (Au NS). Например, мы продемонстрировали, как термометрия на основе флуоресценции может быть применена для оценки лазерно-индуцированного нагрева раствора флуоресцентного красителя, содержащего Au NS. Затем мы оценили лазерно-индуцированный нагрев Au NS внутри клеток и его влияние на распределение внутриклеточной температуры [4,5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Государственное задание, Паспорт 2019-1080 (Госзадание 2019-1080).

Список литературы

1. Kim, B.Y.S.; Rutka, J.T.; Chan, W.C.W. Nanomedicine // *N. Engl. J. Med.*, vol. 363, 2434–2443, 2010.
2. Kelkar, S.S.; Reineke, T.M.; Chan, W.C.W. Theranostics: Combining Imaging and Therapy // *Bioconjug. Chem.*, vol. 22, pp. 1879–1903, 2011.
3. M. Stepanova, A. Dubavik, A. Efimova, M. Konovalova, et.al. Magneto-Luminescent Nanocomposites Based on Carbon Dots and Ferrite with Potential for Bioapplication // *Nanomaterials*, vol. 12 (9), pp. 1-15, 2022.
4. A.R. Muslimov, A.S. Timin, V.R. Bichaykina, et al. Biomimetic drug delivery platforms based on mesenchymal stem cells impregnated with light-responsive submicron sized carriers // *Biomater. Sci.*, vol. 8, pp. 1137-1147, 2020.
5. O.O. Peltek, E. Ageev, A. Dubavik, O.S. Epifanovskaya, et al. Fluorescence-based thermometry for precise estimation of nanoparticle laser-induced heating in cancerous cells at nanoscale // *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022 in press

ФОТОАКТИВАЦИЯ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ОКСИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ

Д. А. Гончарова^{1*}, О. А. Реутова¹, В. А. Светличный¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, ул. Ленина, д. 36

*E-mail: dg_va@list.ru

В настоящее время использование направленной фотоактивации для повышения антибактериального действия полупроводниковых наноструктур для борьбы с патогенными бактериями и вирусами является многообещающей технологией. В работе исследовано влияние оксидных НЧ, полученных импульсной лазерной абляцией, на бактерию золотистого стафилококка при облучении диодным источником света с длиной волны 375 нм. Показано влияние концентрации и способа получения НЧ в присутствии и отсутствии облучения, а также установлено влияние времени облучения НЧ на рост бактерий.

Широкое применение антибиотиков приводит к возникновению штаммов бактерий с множественной лекарственной устойчивостью, поэтому разработка высокоэффективных новых противомикробных препаратов является одной из приоритетных задач в борьбе с антибиотико-резистентными бактериями. Исследования последних лет показывают, что использование наночастиц (НЧ) оксидов переходных металлов в качестве антибактериальных агентов обладает наиболее долгосрочной перспективой по сравнению с антибиотиками [1]. Считается, что у бактерий отсутствует резистентность к НЧ из-за наличия сразу нескольких механизмов антибактериальной активности: (а) электростатический механизм, связанный с прямым взаимодействием (прилипанием) НЧ к бактериям, (б) ионный механизм связан с высвобождением активных ионов металла и (в) механизм образования активных форм кислорода (АФК) при взаимодействии полупроводниковой НЧ с молекулами кислорода и воды. В рамках третьего механизма перспективным является использование света для усиления эффективности генерации АФК, что приводит к фотоактивации (ФА) антибактериального действия оксидных НЧ. Такая ФА перспективна при лечении наружных, локальных бактериальных инфекций и их применения в фотодинамических терапевтических процедурах (фотокаталитической дезинфекции и фототермическом лизисе бактерий) [1]. В настоящей работе исследовано влияние ФА антибактериальной активности НЧ оксидов металлов, полученных импульсной лазерной абляцией (ИЛА), мягким УФ излучением (375 нм) светодиодного источника по отношению к бактериям золотистого стафилококка.

Полупроводниковые НЧ оксидов металлов были приготовлены ИЛА из соответствующих металлических мишеней в воздухе и в воде по методике, описанной в работе [2]. Антибактериальную активность (АА) оценивали методом прямого взаимодействия бактериальных клеток золотистого стафилококка (*S. aureus*) в концентрации 4×10^3 КОЕ/мл в жидкой питательной среде МПБ (мясопептонный бульон) и НЧ с концентрацией 0, 50, 100 и 1000 мг/л. Общий объем раствора составлял 1,5 мл.

ФА осуществлялась светодиодом с длиной волны излучения 375 нм. Светодиод был расположен на расстоянии 12,5 см от поверхности раствора, таким образом создавалась равномерность освещения на окружность диаметром 10 см и минимизировался дополнительный нагрев среды. Средняя освещенность составляла всего около 1 мВт/см^2 , максимальное время облучения 4 часа.

Оценка АА осуществлялась 2 способами – путем подсчета числа колониеобразующих единиц и оптически (по мутности среды).

В первом случае в ходе инкубации смешанную суспензию НЧ с бактериями отбирали через 0, 4, 8 и 24 часа по 100 мкл, делали последовательные разведения в 0,9 % NaCl и наносили на чашку с агаром, затем инкубировали в течение 24 часов при 37 °С. Относительное значение роста бактерий рассчитывали по уравнению:

$$(N_{24} - N_0)/N_{24} \quad (1)$$

где N_{24} – количество колониеобразующих единиц после 24 часов инкубации; N_0 – количество колониеобразующих единиц до инкубации.

Оценка влияния времени облучения на рост бактерий была проведена по изменению оптической плотности рассеяния суспензий при длине волны 600 нм, при облучении 1, 2, 3, 4 часа с последующей инкубацией в течение 24 часов без облучения. Расчет уровня ингибирования (%) осуществляли по формуле:

$$((C_{D600} - T_{D600})/C_{D600}) \times 100\% \quad (2)$$

где C_{D600} – оптическая плотность образца, облученного и инкубированного в течение 24 часов без НЧ, при 600 нм; T_{D600} – оптическая плотность образца, облученного и инкубированного в течение 24 часов в присутствии НЧ, при 600 нм.

Результаты исследования, показали, что используемые в работе материалы обладают антибактериальными свойствами. Так, например, частицы ZnO без дополнительного воздействия света проявляли АА бактериостатического действия, что характеризуется отсутствием роста бактерий через 24 часа для концентрации НЧ 100 и 1000 мг/л, а для концентрации 1000 мг/л можно отметить бактерицидное действие, которое связано с гибелью бактерий по сравнению с их исходным количеством. При концентрации НЧ 50 мг/л присутствует период индукции (8 часов), в течение которого количество бактерий не увеличивается, в отличие от образца без НЧ, однако по истечению 24 часов для обоих образцов наблюдается значительный бактериальный рост до порядка 10^7 КОЕ/мл.

Результаты исследования влияния облучения на активацию АА при различных концентрациях НЧ и времени светового воздействия показаны на рис. 1. Видно, что при увеличении концентрации НЧ влияние облучения становится более выраженным (рис. 1а). Необходимо отметить, что малоинтенсивное мягкое УФ воздействие не влияло на рост бактерий в отсутствие НЧ. Исследование влияния времени облучения, показало, что при облучении в течение 1 часа уровень ингибирования роста бактерий составил 88 %, а при максимальном времени облучения (4 часа) достигает 98 % (рис. 1б).

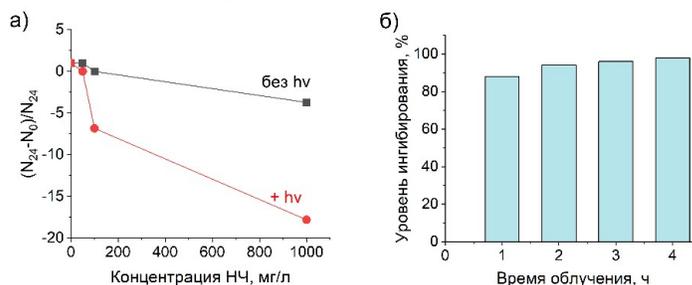


Рис. 1. Влияние облучения при различной концентрации НЧ ZnO, полученных ИЛА в воздухе (а), влияние времени облучения на уровень ингибирования (б).

Полученные результаты показывают, что даже при использовании малоинтенсивного мягкого УФ излучения наблюдается ФА АА оксидных наночастиц. Используемые в работе методики определения АА и оценки количества бактерий были адаптированы для работы с НЧ и показали свою работоспособность. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния параметров облучения (мощности, длины волны облучения, времени экспозиции) на ФА АА различных оксидных структур и их смесей по отношению как к золотистому стафилококку, так и другим бактериальным штаммам.

Список литературы

1. Y. Tang, Z. Qin, S. Yin, H. Sun, Transition metal oxide and chalcogenide-based nanomaterials for antibacterial activities: an overview // *Nanoscale*, vol. 13, pp. 6373–6388, 2021.
2. E.A. Gavrilenko, D.A. Goncharova, I.N. Lapin, et.al. Comparative Study of Physicochemical and Antibacterial Properties of ZnO Nanoparticles Prepared by Laser Ablation of Zn Target in Water and Air // *Materials*, vol. 12 (86), pp. 1–15, 2019.

АНАЛИЗ ФОТОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУБСТРАТОВ NADH:FMN-ОКСИДОРЕДУКТАЗЫ БАКТЕРИЙ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКИХ СРЕД НА ФЕРМЕНТАТИВНУЮ РЕАКЦИЮ

Д. В. Гульнов^{1*}, М. А. Герасимова¹, Л.А. Суковатый¹, Е. В. Немцева^{1,2}

¹*Сибирский федеральный университет*

660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79

²*Институт биофизики СО РАН*

660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/50

*E-mail: dgulnov@sfu-kras.ru

Целью работы являлось выявление эффекта вязких сред на основе глицерина и сахарозы на структурные характеристики NADH и FMN. Были проанализированы спектры поглощения и флуоресценции, времена жизни флуоресценции методами оптической спектроскопии, а также образование водородных связей и конформационные переходы методами молекулярной динамики. Было показано, что эффект вязких сред вызван не полярностью сред, а специфическими взаимодействиями с соразтворителем. Сделан вывод, что перераспределение водородных связей влияет на скорость диффузии FMN и NADH и взаимодействие с ферментом, что в совокупности оказывает эффект на скорость ферментативной реакции, катализируемой NAD(P)H:FMN-оксидоредуктазой.

Никотинамидадениндинуклеотид (NADH) и флавиномононуклеотид (FMN) являются широко распространенными клеточными компонентами, кофакторами и субстратами большого числа ферментативных реакций. При этом они обладают люминесцентными свойствами в ближнем УФ и видимом диапазоне, что даёт возможность анализировать активность ферментов и различные межмолекулярные взаимодействия, в том числе неинвазивно, во внутриклеточных условиях [1]. В данной работе был исследован эффект вязких сред на основе растворов глицерина и сахарозы на структурные характеристики NADH и FMN с целью установления механизмов влияния таких сред на активность NAD(P)H:FMN-оксидоредуктазы светящихся бактерий. Известно, что общие эффекты вязких сред на ферментативные реакции (за счет изменения вязкости или полярности микроокружения) могут сопровождаться специфическим взаимодействием соразтворителей с реагентами. В частности, присутствие соразтворителя может привести к перестройке водородных связей между молекулами субстрата и растворителя (воды), что, в свою очередь, может вызывать изменение гидродинамического объема молекул, их конформационного состояния, электростатического потенциала поверхности и других параметров, важных для фермент-субстратного взаимодействия.

Были исследованы структурные характеристики NADH и FMN в буферных растворах с глицерином (10–70 вес.%) и сахарозой (10–60 вес.%) методами оптической спектроскопии и молекулярного моделирования. Спектры поглощения в диапазоне 200–700 нм регистрировали спектрофотометром Cary-5000 (Agilent Technologies). Характеристики флуоресценции определяли с помощью спектрофлуорометра Fluorolog-3 (Horiba Jobin Yvon), оснащенного модулем DeltaHub для измерения спадов методом счета одиночных фотонов с временной корреляцией, при возбуждении 373 и 407 нм. Для регистрации время-разрешенных спадов флуоресценции использовали возбуждение импульсным светодиодом NanoLED N-370 с длительностью импульса ~1.2 нс и лазерным диодом DD-405L с длительностью импульса ~50 пс. Компоненты времени жизни флуоресценции определяли методом глобального анализа, качество описания оценивали по статистическому критерию χ^2 и распределению взвешенных остатков. Все измерения проводили при 25 °С.

Молекулярное моделирование структуры NADH и FMN в окружении молекул воды и смесей вода-соразтворитель проводили с помощью GROMACS 2020.4. На основе полученных молекулярно-динамических траекторий рассчитывали заселенность водородных связей между гетероатомами нуклеотидов и молекулами воды, глицерина, са-

харозы. Конформационные состояния нуклеотидов в ходе моделирования анализировали по динамике расстояния между адениновым и никотинамидным кольцом (для NADH) и между центром изоаллоксазинового кольца и фосфатной группой (для FMN).

Было получено, что первая полоса поглощения (S_1) обоих субстратов претерпевает батохромный сдвиг с ростом концентрации обоих соразтворителей. При этом вторая полоса поглощения FMN (S_2) сдвигается гипсохромно в средах с глицерином и батохромно в средах с сахарозой. Наблюдаемые эффекты не могут быть объяснены меньшей полярностью смесей буфер-соразтворитель по сравнению с буферным раствором, поскольку известно, что с понижением полярности среды первые полосы поглощения как FMN, так и NADH смещаются гипсохромно [2,3].

Спектры флуоресценции нуклеотидов продемонстрировали гипсохромный сдвиг с увеличением концентрации соразтворителей, и этот эффект был более выражен для NADH (на ~10 нм), чем для FMN (на ~2 нм). Анализ время-разрешенных характеристик показал, что наблюдается увеличение среднего времени жизни флуоресценции нуклеотидов в вязких средах: от 4,69 до 4,96 нс для FMN и от 0,42 до 0,76 нс для NADH. При этом наблюдается перераспределение вкладов двух компонент времени жизни NADH, что может говорить о смещении равновесия между «закрытой» и «открытой» конформациями данного субстрата в вязких средах.

Моделирование молекулярной динамики нуклеотидов в присутствии глицерина и сахарозы показало, что стабильные водородные связи с растворителем (водой) образуют, главным образом, фосфатные группы нуклеотидов (заселенность водородных связей за время моделирования составляла около 100%). Было получено, что молекулы глицерина могут частично замещать молекулы воды в таких взаимодействиях, а сахароза не обладает такой способностью. Также установлено, что в присутствии глицерина изменяется вероятность образования NADH «закрытой» конформации, в то время как влияния соразтворителей на конформацию FMN отсутствует.

Таким образом, на основе полученных результатов были сделаны следующие предварительные выводы:

1) изменение фотофизических характеристик NADH и FMN в растворах с глицерином и сахарозой обусловлено не полярностью среды, а специфическими взаимодействиями нуклеотидов с водой и соразтворителем;

2) установленные водородные связи с соразтворителем могут влиять на скорость диффузии NADH и FMN, и, следовательно, отражаться на скорости ферментативной реакции, катализируемой NAD(P)H:FMN-оксидоредуктазой светящихся бактерий;

3) изменение сети водородных связей между кольцами, фосфатными группами нуклеотидов и молекулами воды/соразтворителя может влиять на скорость связывания ферментом NADH и FMN, а значит – на активность NAD(P)H:FMN-оксидоредуктазы в вязких средах.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования РФ (проект FSRZ-2020-0006) и РФФИ (проект 20-34-90118).

Список литературы

1. A. Mukherjee, C.M. Schroeder. Flavin-based fluorescent proteins: emerging paradigms in biological imaging // *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 31, pp. 16-23, 2015.
2. A. Visser, J.S. Santema, A. Van Hoek. Spectroscopic and dynamic characterization of FMN in reversed micelles entrapped water pools // *Photochemistry and photobiology*, vol. 39(1), pp. 11-16, 1984.
3. P. Fischer, J. Fleckenstein, J. Hönes Spectroscopic investigation of dihydronicotinamides-I: conformation, absorption, and fluorescence // *Photochemistry and photobiology*, vol. 47 (2), pp. 193-199, 1988.

КОМПЛЕКСЫ ХЛОРИНА e_6 С МАКРОМОЛЕКУЛЯРНЫМИ НОСИТЕЛЯМИ

И. В. Клименко^{1*}, А. В. Лобанов^{1,2}

¹ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук
119334, Российская Федерация, Москва, ул. Косыгина, д. 4

*E-mail: inna@deom.chph.ru

²ФГБУН Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук

119334, Российская Федерация, Москва, ул. Косыгина, д. 4

В работе представлены результаты изучения спектрально-флуоресцентных свойств новых супрамолекулярных комплексов на основе хлорина e_6 (Xe_6) с различными биосовместимыми макромолекулярными носителями. Показано, что сольubilизация Xe_6 во всех представленных комплексах препятствует его агрегации и обеспечивает эффективную стабилизацию либо в мономерной флуоресцентно-активной форме, либо в виде комплекса с переносом заряда.

Фотодинамическая терапия (ФДТ) – это перспективный, быстро развивающийся, неинвазивный метод лечения онкологических и других заболеваний, основанный на применении фотосенсибилизаторов (ФС), природных или искусственно синтезированных веществ, способных к фотосенсибилизации биологических тканей. В настоящее время в клинической практике применяется целый ряд препаратов первого-третьего поколений с высокой противоопухолевой активностью, в том числе и хлорофиллосодержащие ФС (хлорины и пурпурины типа «Фотолон», «Фотодитазин», «Радахлорин», «Фоскан»). Однако многие ФС, в том числе на основе хлоринов, обладают высокой гидрофобностью. Это свойство вещества создает определенные проблемы при внутривенном введении препарата и влияет на его доставку в опухоль и флуоресценцию в клетках. Кроме того, агрегация ФС в водном растворе снижает его фотодинамическую активность и уменьшает квантовый выход активных форм кислорода. Поиски «идеальных» ФС и новых противоопухолевых лекарственных средств продолжаются постоянно [1, 2], причем исследования идут в направлении создания специфичных для каждого заболевания ФС и создания одного ФС, универсального для большинства заболеваний. Большие усилия направлены на создание носителей для векторной доставки ФС. Данные носители призваны улучшить физико-химические и медико-биологические свойства ФС, а именно увеличить растворимость и уменьшить агрегацию ФС, увеличить квантовый выход генерации синглетного кислорода, контролируемо изменять механизм фотокаталитической активности [3].

В данной работе с целью снижения гидрофобности и уменьшения агрегации ФС предлагается использование различных биосовместимых водорастворимых вспомогательных веществ в комплексе с хлорином e_6 (Xe_6). Xe_6 – это фотосенсибилизатор, обладающий способностью избирательно накапливаться в целевых тканях, противораковый иммуномодулятор, активирующий систему клеточного иммунитета, в том числе, клетки-киллеры, распознающие и уничтожающие раковые клетки. Xe_6 обладает следующими спектральными и энергетическими характеристиками: максимум поглощения находится в области 660 ± 5 нм, что соответствует области наибольшей оптической прозрачности для биологических тканей («терапевтическое окно»), а квантовый выход синглетного кислорода достигает 0.7. Три карбоксильные группы обеспечивают молекуле Xe_6 гидрофильность, эффективный транспорт и возможность накопления в целевых тканях. Для Xe_6 характерны также высокая фотодинамическая активность при использовании малых доз и низкая токсичность. В качестве биосовместимых вспомогательных веществ – макромолекулярных носителей – использовались поливиниловый спирт гидролизованый (ПВС), поли-*N*-винилпирролидон (ПВП), натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ) и Кремофор® PEG-40, которые широко применяются в качестве добавок в фармакологических и косметических средствах.

Были синтезированы супрамолекулярные комплексы Xe_6 (5 ммоль/л) с данными макромолекулярными вспомогательными веществами, и изучены их оптическое поглощение (рис. 1) и флуоресценция (рис. 2).

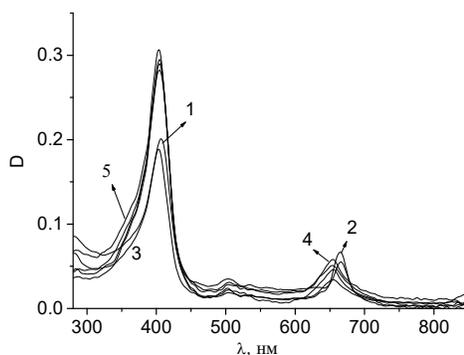


Рис. 1. Спектры поглощения супрамолекулярных систем на основе Хе₆:
1. ПЭГ – Хе₆, 2.ПВП – Хе₆, 3. Na-КМЦ – Хе₆, 4. ПВС – Хе₆, 5. Хе₆ в водном растворе.

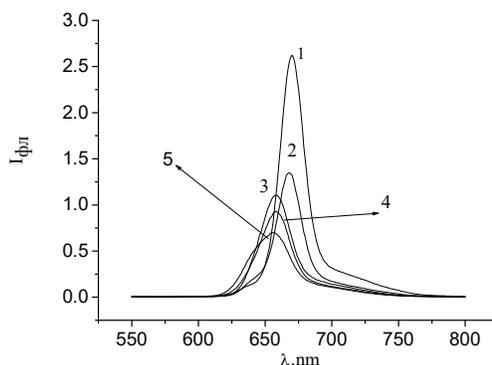


Рис. 1. Спектры флуоресценции супрамолекулярных систем на основе Хе₆:
1. ПЭГ – Хе₆, 2.ПВП – Хе₆, 3. Na-КМЦ – Хе₆, 4. ПВС – Хе₆, 5. Хе₆ в водном растворе.

Анализ спектрально-люминесцентных свойств представленных комплексов показал, что добавление макромолекулярных вспомогательных веществ приводит к увеличению интенсивности люминесценции Хе₆ (рис.2). Смещение спектра поглощения Хе₆ в длинноволновую область (рис.1) при использовании всех указанных выше макромолекулярных вспомогательных веществ является хорошей предпосылкой для повышения проницаемости тканей для видимого света и снижения поглощения света гемоглобином крови в области 500-600 нм, что играет существенную роль для повышения эффективности ФДТ.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИБХФ РАН (№ гос. регистрации 01201253304) и в рамках Программы фундаментальных научных исследований РФ (Госзадание FFZE-2022-0009, ФИЦ ХФ РАН)

Список литературы

1. I.V. Klimenko, A.V. Lobanov. Biocompatible supramolecular systems based on chlorin e₆: preparation, photophysical properties // *Macroheterocycles*, vol. 13(2), pp. 142-146, 2020.
2. I.V. Klimenko, A.V. Lobanov. Photosensitizing properties of supramolecular systems based on chlorin e₆ // *J of Biomedical Photonics & Eng.*, vol. 2(4), pp. 040310-1-5, 2016.
3. И.В. Клименко, А.В. Лобанов. Спектрально-флуоресцентные свойства супрамолекулярных систем на основе хлорина е₆. // *Хим. физика В*. т. 37 (1), стр. 13-20, 2018.

ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ФТАЛОЦИАНИН-ГРАФЕН КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

И. В. Клименко^{1*}, Е.А. Трусова², А.М. Афзал², А.В. Лобанов^{1,3}, А.В. Хромов⁴

¹ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук
119334, Российская Федерация, Москва, ул. Косыгина, д. 4

*E-mail: inna@deom.chph.ru

² ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук
119334, Российская Федерация, Москва, Ленинский проспект, д. 49

³ФГБУН Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова
Российской академии наук

119334, Российская Федерация, Москва, ул. Косыгина, д. 4

⁴ ФГАОУ ВО "Российский университет дружбы народов"

117198, Российская Федерация, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

В работе представлены результаты исследования фотофизических свойств гибридных систем на основе двух металл(Al, Zn)-фталоцианинов (ФЦ) и суспензии бескислородного графена. Показано, что присутствие графена в системе предотвращает агрегацию ФЦ и способствует их стабилизации в виде мономеров. Полученные результаты могут быть использованы при создании новых материалов для различных областей науки и техники.

Тетрапиррольные макрогетероциклические соединения (хлорины, порфирины, фталоцианины (ФЦ) и их аналоги) в настоящее время вызывают большой интерес у исследователей, работающих в области биохимии, медицинской химии и химической технологии. При использовании тетрапирролов и их металлокомплексов в различных биомедицинских приложениях требуется их солюбилизация в водных средах. Одним из путей решения данной задачи является создание различных супрамолекулярных систем или супрамолекулярных ансамблей с эффективными межмолекулярными взаимодействиями. Однако исследования процессов супрамолекулярной сборки осложняются склонностью тетрапирролов, в том числе и ФЦ, к агрегации в водных растворах. Способом, позволяющим контролировать агрегацию, является комплексообразование с участием двумерных (2D) материалов, например графена или материалов на его основе, в составе гибридных систем совместно с фталоцианином [1]. Данные гибридные системы имеют большой потенциал применения – от фотовольтаики в качестве источников света и элементов фотопреобразователей до медицины в виде лекарственных препаратов нового поколения для диагностики и терапии онкологических заболеваний.

В зависимости от состава таких гибридных систем ФЦ могут находиться в мономолекулярной форме или образовывать молекулярные агрегаты различных типов. Для эффективного использования ФЦ в биомедицинских приложениях в качестве фотосенсибилизаторов принципиально важно присутствие ФЦ в мономолекулярной форме, позволяющей в отсутствие процессов аннигиляции триплетных возбужденных состояний запустить механизм триплет-триплетного переноса энергии на кислород, что приводит к фотодинамическому повреждению целевых биологических структур. Однако, для диагностики, с другой стороны, важно использовать тетрапирролы, в том числе и ФЦ, не имеющие побочных фототоксических свойства, что может быть достигнуто при направленном получении агрегатов с помощью дополнительных солюбилизаторов и вспомогательных макромолекулярных носителей.

В данной работе мы получили и исследовали с помощью спектральных методов гибридные системы на основе двух металл(Al, Zn)-фталоцианинов (MeФЦ, AlClФЦ и ZnФЦ) и суспензии бескислородного графена, полученного сонохимическим методом в среде *N,N*-диметилформамид (ДМФА) – вода ($C_{\text{ДМФА}} = 4.7 \%$ об.), а также провели их качественное и количественное сравнение. Графенсодержащие комплексы получали при титровании 2 мл раствора MeФЦ в ДМФА суспензией графена в смеси ДМФА-

вода (0÷2 мл) [2]. Наличие агрегатов AlClФЦ и ZnФЦ в растворах, а также установление роли графена в процессе агрегирования MeФЦ определяли, используя спектрофотометр UV-1900 (Beijing Purkinje General Instr. Co. Ltd.) и спектрофлуориметр Флуорат-02 Панорама («Люмэкс», Россия).

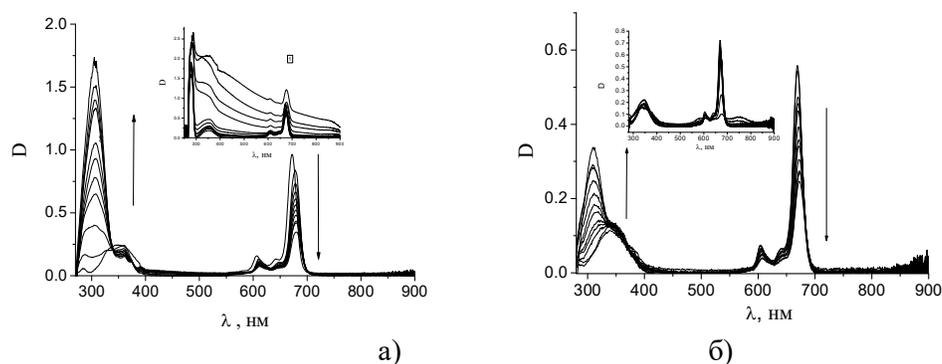


Рис. 1. Спектры оптического поглощения систем AlClФЦ-графен (а) и ZnФЦ-графен (б) в смеси ДМФА-вода. Стрелками показано увеличение концентрации графена в системе. Спектры растворов AlClФЦ- ДМФА-вода и ZnФЦ-ДМФА-вода приведены во вставках.

Полученные данные (рис.1), свидетельствуют о незначительном уменьшении количества мономеров ФЦ в растворе при титровании суспензией графена, в отличие от системы без графена (вставки к рисункам). Для всех систем с графеном характерно отсутствие максимумов поглощения в области 705-780 нм, являющихся критерием образования J-агрегатов. Уменьшение интенсивности и сдвиг в длинноволновую область линий ~640–650 нм, отвечающих за наличие H-агрегатов в системе, является признаком увеличения расстояния между молекулами в H-агрегатах и, следовательно, частичном разделении агрегатов в присутствии графена, изначально образуемых ФЦ за счет дисперсионных взаимодействий между ароматическими системами. Изменения в области В-полосы при титровании суспензией графена связаны с образованием комплекса ФЦ – графен, в том числе появление изобестических точек в области 323-330 нм в спектрах оптического поглощения гибридных систем является критерием образования продуктов прямого присоединения молекул ФЦ к графену. Данные по флуоресценции также подтверждают отсутствие агрегации ФЦ в присутствии суспензии графена. Таким образом, графен предотвращает агрегацию ФЦ и стабилизирует их в фотохимически активной мономерной форме. Данный факт придает комплексу ФЦ – графен свойства, необходимые при использовании его в качестве платформы для векторной доставки лекарств и ранней диагностики.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИБХФ РАН (№ гос. регистрации 01201253304), Госзадания 075-00715-22-00 (ИМЕТ РАН) и в рамках Программы фундаментальных научных исследований РФ (Госзадание FFZE-2022-0009, ФИЦ ХФ РАН)

Список литературы

1. I.V. Klimenko, A.V. Lobanov, E.A. Trusova, et al. New hybrid oxygen-free graphene and phthalocyanine aluminum structures: preparation and physicochemical properties // Russ. J.of Phys. Chem. B. vol. 13 (6), pp. 964-968, 2019.
2. I.V. Klimenko, E.A. Trusova, A.N. Shchegolikhin, et al. Surface modification of graphene sheets with aluminum phthalocyanine complex // Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures. vol. 30 (1), pp. 133-139, 2022.

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНДОЦИАНИНА ЗЕЛЕНОГО

Т. С. Кондратенко^{1*}, И. Г. Гревцева¹, Т. А. Чевычелова¹, О. В. Овчинников¹

¹*Воронежский государственный университет
394018, Российская Федерация, Воронеж, Университетская пл., д. 1
E-mail: optichka@yandex.ru

Исследован нелинейно-оптический отклик исходных молекул красителя Индоцианина зеленого (ICG) методом Z-сканирования при различных энергиях лазерных импульсов с длиной волны 532 нм и длительностью 10 нс. Установлено, что нелинейно оптический отклик как водных, так и этанольных растворов ICG в концентрациях 10^{-2} до 10^{-5} моль/л при различных энергиях лазерных импульсов (0.005 мДж÷0.16 мДж) демонстрирует наличие нелинейного поглощения, механизмом которого является обратное насыщение поглощения (RSA) за счет значительного поглощения во второе возбужденное состояние, а также триплетного поглощения красителя в возбужденном состоянии. Для водных растворов ICG, содержащих J-агрегаты наблюдается отрицательная динамическая линза нетепловой природы (нелинейный показатель преломления $\gamma = -1.5 \cdot 10^{-14}$ см²/Вт).

В настоящее время в ведущих международных и российских научных и технологических центрах выполняются фундаментальные и прикладные исследования, направленные на разработку «умных» материалов, свойства которых обеспечат управление параметрами оптического излучения для создания эффективных ограничителей оптической мощности, необходимых для защиты глаз, приборов и устройств от мощных лазерных потоков, выравнивания интенсивности световых потоков в волоконно-оптических системах передачи и обработки информации и т.п. Одним из перспективных материалов является краситель индоцианин зеленый (ICG) и гибридные комплексы на его основе. Однако, нелинейно-оптические свойства ICG мало исследованы [1].

В работе рассмотрены нелинейно-оптические свойства различных форм ICG: мономер, димер, J-агрегаты. Для получения образцов ICG в форме мономера использовали этанольный раствор с концентрациями 10^{-3} ÷ 10^{-5} моль/л и водный раствор красителя с концентрациями 10^{-5} моль/л, димеры формировались в водном растворе ICG с концентрациями 10^{-3} ÷ 10^{-4} моль/л, которые получали методом последовательного разбавления. J-агрегаты красителя формировали выдерживанием водного раствора ICG в концентрации 10^{-3} моль/л при температуре 65-67⁰С в течение 32 часов. Интервал температур и время выдерживания подбирали исходя из предварительных экспериментов по нагреванию водных растворов красителя.

Структуру красителя контролировали по спектрам оптического поглощения. Исходно спектр поглощения водного раствора красителя в концентрации 10^{-5} моль/л и этанольных растворов с различными концентрациями представляет собой кривую с максимумом в области 780 нм, который соответствует поглощению мономера ICG и особенностью в области 700 нм, которая соответствует колебательной структуре $\pi \rightarrow \pi^*$ перехода мономера. Рост концентрации красителя в водном растворе до 10^{-3} моль/л приводит к появлению в спектре поглощения полосы с пиком 700 нм и падению оптической плотности в полосе мономеров, в спектре люминесценции падению интенсивности свечения в полосе мономеров, что свидетельствует о формировании димеров. Для водных растворов, выдержанных при температуре 65-67⁰С в течение 32 часов узкий интенсивный максимум в области 900 нм соответствует формированию высокоупорядоченных J-агрегатов в растворе.

Измерения нелинейно-оптических свойств образцов проводились с использованием методики Z-сканирования, подробно описанной в работе [2].

На рисунке 1а представлены кривые Z-сканирования, записанные в режиме открытой апертуры. Для исследуемых образцов водного раствора ICG в различных концентрациях наблюдается симметричный относительно фокальной плоскости линзы ($Z = 0$) провал, что свидетельствует о сильном нелинейном поглощении, механизмом которого является обратное насыщение поглощения (RSA).

Эффект обратного насыщения поглощения в красителе может возникать при двухквантовых переходах с участием как второго возбужденного состояния (S2), так и триплетного состояния красителя (Рис. 1b,c) [1]. По мере увеличения концентрации красителя или энергии импульса величина провала в Z-скане увеличивается. Так как повышение концентрации красителя ведет к формированию димеров в растворе, можно сделать вывод, что в основном обратное насыщение поглощения реализуется по трехуровневой схеме с участием второго возбужденного состояния ICG.

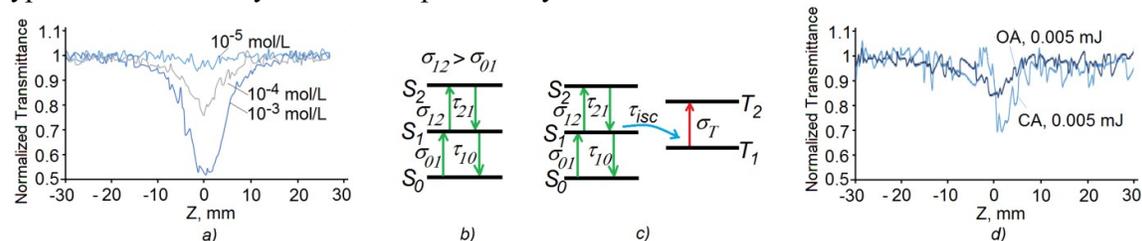


Рис. 1. Z-сканы водных растворов ICG в различных концентрациях, записанные с использованием 10 нс лазерных импульсов (532 нм) с энергией 0,02 мДж (а) в схеме с ОА, RSA в трехуровневой (b) и пятиуровневой (c) энергетических диаграммах для ICG, Z-сканы раствора ICG, содержащего J-агрегаты, записанные с использованием 10 нс лазерных импульсов (532 нм) в схемах с ОА и СА (d)

Для растворов ICG, содержащих J-агрегаты в схеме с ОА наблюдается незначительный провал, который несимметричен относительно 0 (Рис. 1d). Асимметрию в контур вносит нелинейная рефракция отрицательного знака. Оценку нелинейного показателя преломления проводили аппроксимацией кривых Z-сканов с помощью выражения [3]:

$$T = 1 + \frac{2(-\rho x + 2x - 3\rho)}{(x^2 + 9)(x^2 + 1)} \Delta\Phi_0 \quad (1)$$

здесь $\rho = \beta/2k\gamma$, $x = z/z_0$, $\Delta\Phi_0 = k\gamma I_0 L_{eff}$ – сдвиг фаз в фокусе за счет нелинейной рефракции и нелинейного поглощения, I_0 – интенсивность лазерного излучения в фокусе, $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$ – эффективная длина образца, α – линейный коэффициент поглощения, γ – нелинейный показатель преломления, β – коэффициент нелинейного поглощения материалов. Величина нелинейного показателя преломления γ для J-агрегатов составляла $-1.5 \cdot 10^{-14} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$. Оценки вклада тепловой рефракции в наблюдаемые Z-сканы для исследованных образцов, выполненные на основе решения уравнения теплопроводности с условием пренебрежения слагаемым теплопроводности ввиду его малости для импульсного излучения показывают, что тепловые эффекты в случае 10 нс импульсов пренебрежимо малы. Более того, они меньше предела обнаружения нелинейной рефракции для используемой экспериментальной установки при энергии импульса 0.06 мДж, составляющей $5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$. Эти эффекты давали бы отрицательную рефракцию с $\gamma \sim 10^{-17} \text{ см}^2/\text{Вт}$, что на три порядка меньше γ для J-агрегатов ICG.

Работа поддержана грантом Президента РФ № МК-3411.2021.1.2.

Список литературы

1. L. De Boni, D.C.J. Rezende, C.R. Mendonca. Reverse saturable absorption dynamics in indocyanine green // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, vol. 190, pp. 41–44, 2007.
2. T.S. Kondratenko, A.I. Zvyagin, M.S. Smirnov, et.al. Luminescence and nonlinear optical properties of colloidal Ag₂S quantum dots // Journal of Luminescence, vol. 208, pp. 193–200, 2019.
3. X. Liu, S. Guo, H. Wang, and L. Hou. Theoretical study on the closed-aperture Z-scan curves in the materials with nonlinear refraction and strong nonlinear absorption // Opt. Commun., vol. 197(4–6), pp. 431–437, 2001.

НАНОПУЗЫРЬКИ ВОКРУГ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ В ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПОЛЯХ ДЛЯ ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ ТЕРАПИИ

А. С. Костюков^{1*}, И. Л. Исаев², А. Е. Ершов^{1,2,3}, В. С. Герасимов^{1,2,3}, П. Н. Сёмина¹,
С. П. Полотов^{1,3}, С. В. Карпов^{1,4,3}

¹*Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
E-mail: Kostukov-a@yandex.ru

²*Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50/44*

³*Федеральный Сибирский научно-клинический центр ФМБА России
660037, Российская Федерация, Красноярск, ул. Коломенская, 26/2*

⁴*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50/38*

Исследованы условия образования наноразмерных паровых полостей в водной среде вокруг биосовместимых плазмонных наночастиц, избирательно связанных с мембраной злокачественных клеток под действием пикосекундного лазерного излучения. Определены условия роста давления на клеточную мембрану в начальный момент образования пузырьков, значительно превышающие порог необратимого повреждения. Получены сведения о кинетике пространственного распределения давления, температуры и относительной доли пара в системе «наночастица-мембрана-среда». Обращено внимание на преимущества использования для противоопухолевой терапии биосовместимых, идеально поглощающих плазмонных наночастиц «ядро-оболочка».

Методы направленного воздействия на злокачественные клетки составляют основу стратегии противоопухолевой терапии с использованием различных физических факторов. Плазмонные наночастицы (НЧ) обладают важным фототермическим свойством – будучи помещенными в жидкую среду, они могут генерировать вокруг себя паровые полости (ПП) при нагреве импульсным лазерным излучением. Гидродинамические эффекты, сопровождающие процесс парообразования, находят важные применения, в первую очередь в методах лечения злокачественных опухолей.

Объектом исследования в настоящей работе являются двухслойные плазмонные НЧ типа «ядро-оболочка» с ядром из AZO (допированный алюминием оксид цинка) и обладающей высокой биосовместимостью золотой оболочкой. Поверхность НЧ функционализирована ДНК-аптамерами – биомакромолекулами размером 3–7 нм, позволяющими НЧ избирательно связываться исключительно с мембранами злокачественных клеток, что значительно повышает локализацию воздействия.

Короткие лазерные импульсы и большая поглощенная энергия возбуждения плазмонных НЧ создают нестационарные тепловые поля на границах пар-жидкость, а также области высокого давления рядом с возникающими ПП, способные повреждать мембраны злокачественных клеток.

Эффективная терапия основана на трех важных факторах: длине волны излучения, максимальном поглощении НЧ и попадании резонансной длины волны НЧ в окно оптической прозрачности биологических тканей.

Разработанная численная модель [1,2] позволяет исследовать характеристики наноразмерной системы в момент начала парообразования при различных условиях, типах и размерах плазмонных НЧ, включая двухкомпонентные НЧ с золотой оболочкой, а также изучать кинетику парообразования, с учетом термического сопротивления на границе раздела фаз.

Важным этапом верификации модели было сравнение результатов вычислений с имеющимися экспериментальными данными [3] и данными других авторов для аналогичных условий [4].

При импульсном нагреве НЧ вокруг неё происходит быстрое образование паровой полости, которая создает волну высокого давления, концентрирующуюся между

НЧ и мембраной злокачественной клетки, что позволяет значительно снизить энергию лазерного излучения и предотвратить повреждение ближайших здоровых клеток.

Величина давления на мембрану клетки (рис. 1), значительно превышающая пороговые значения прочности клеточной мембраны, соответствует состоянию необратимого повреждения злокачественной клетки. При этом диапазон необходимых для успешной терапии значений плотности энергии F пикосекундного лазерного импульса лежит ниже порога, при котором начинается плавление золотой оболочки НЧ. Это позволяет не учитывать эффекты, связанные с температурной деградацией плазмонного резонанса НЧ. Так, для лазерного импульса длительностью $\tau=25$ пс пороговые значения F лежат в диапазоне 9-20 Дж/м².

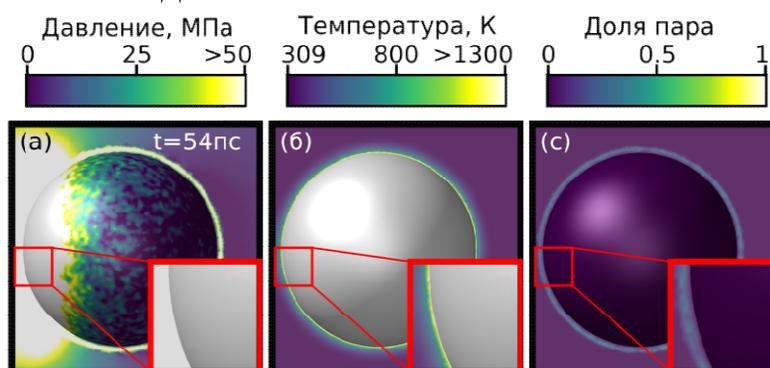


Рис. 1. Пространственное распределение (а) – давления, (б) – температуры, (с) – объемной доли пара вокруг наночастицы «ядро-оболочка» с диаметром ядра 58 нм и полным диаметром 74 нм при облучении лазерным импульсом $\lambda = 700$ нм длительностью $\tau = 25$ пс и плотностью энергии $F = 20$ Дж/м² в момент времени $t = 54$ пс после начала импульса.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования РФ (проект № FSRZ-2020-0008), а также РФФИ и Красноярским краевым фондом науки (проект №20-42-240003).

Список литературы

1. A.S. Kostyukov, I.L. Isaev, A.E. Ershov, et.al. Part I. Nanobubbles in pulsed laser fields for anticancer therapy: in search of adequate models and simulation approaches // Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 55 (17), pp. 175401, 2022.
2. A.S. Kostyukov, I.L. Isaev, A.E. Ershov, et.al. Part II. Nanobubbles around plasmonic nanoparticles in terms of modern simulation modeling: what makes them kill the malignant cells? // Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 55 (17), pp. 175402, 2022.
3. A. Siems, S.A.L. Weber, J. Boneberg, et.al. Thermodynamics of nanosecond nanobubble formation at laser-excited metal nanoparticles // New Journal of Physics, vol. 13, p. 043018, 2011.
4. J. Lombard, T. Biben, and S. Merabia. Threshold for vapor nanobubble generation around plasmonic nanoparticles // The Journal of Physical Chemistry C, vol. 121 (28), pp. 15402–15415, 2017.

НАНОСЕНСОР pH НА ОСНОВЕ АНТИСТОКСОВОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК

К. А. Лаптинский*, М. Ю. Хмелева, Т. А. Доленко

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1*

*E-mail: laptinskiy@physics.msu.ru

В работе представлены результаты исследования антистоксовой люминесценции карбоксилированных углеродных точек, полученных гидротермальным методом синтеза. Продемонстрировано влияние pH водной суспензии углеродных точек на их люминесценцию в антистоксовой области, что открывает перспективы использования этих наночастиц в качестве сенсоров параметров окружающей среды.

Углеродные точки (УТ) благодаря уникальному набору своих свойств нашли применение в различных областях науки и техники – от маркеров для маркировки банкнот до сенсоров различных ионов в водах и прототипов тераностических наноагентов. Как известно, фотолюминесценция (ФЛ) УТ характеризуется высоким значением квантового выхода люминесценции (десятки процентов), однако для большинства УТ это достигается при возбуждении ФЛ в ультрафиолетовой области спектра, что существенно ограничивает применение УТ в биомедицинской области. В связи с этим особое внимание привлекают исследования ФЛ УТ в антистоксовой области спектра, которой посвящены лишь единичные публикации [1]. В настоящей работе исследуется антистоксова фотолюминесценция (АФЛ) УТ и ее зависимость от водородного показателя воды.

Для регистрации спектров АФЛ была собрана экспериментальная установка, в которой в качестве источника накачки использовался импульсный наносекундный Nd:YAG-лазер (модель LQ629-100, Solar Laser Systems, Беларусь). Третья гармоника (355 нм, длительность импульса 10 нс, частота следования импульсов 100 Гц) Nd:YAG-лазера использовалась для накачки параметрического генератора света LP603 (Solar Laser Systems, Беларусь), излучение которого являлось источником возбуждения АФЛ. Использование данной лазерной системы позволило изменять длину волны накачки в диапазоне от 532 до 1070 нм. Была собрана 90-градусная схема, в которой зондирование образца в кювете проводилось через дно кюветы, а рассеянное под углом 90° излучение с помощью систем линз собиралось на системе регистрации, состоящей из монохроматора (МВР80) с фокусным расстоянием 500 мм, собранного по схеме Черни-Тернера, оснащенного решеткой 150 штр/мм и ПЗС-камерой (Horiba-Jobin Yvon, Synapse VIUV). На входе системы регистрации использовались светофильтры СЗС-22 и СЗС-23. Практическое спектральное разрешение экспериментальной установки составило 2 нм. Мощность возбуждающего излучения, попадающего на образец, регистрировалась с помощью измерителя мощности Ophir Nova 2, оснащенного пироэлектрическим сенсором PE50-DIF-C.

В качестве объектов исследования использовались УТ, полученные гидротермальным методом синтеза из лимонной кислоты и этилендиамина. Для увеличения количества карбоксильных групп на поверхности УТ высушенный остаток суспензии после синтеза смешивался со смесью нитрида натрия и соляной кислоты для удаления амидных групп. Далее, к высушенному остатку добавлялось 12 мл воды и 5 мл раствора NaOH с концентрацией 0.5 М. Для приготовления водных суспензий УТ использовалась деионизированная вода (система очистки воды Millipore Simplicity UV).

Для исследования фотолюминесценции УТ в антистоксовой области были приготовлены водные суспензии карбоксилированных УТ-СООН с концентрациями 5 мг/мл, спектры АФЛ которых при разных длинах волн возбуждения представлены на Рис. 1а. Как видно из рисунка, АФЛ УТ представляет собой широкую бесструктурную полосу с максимумом в районе 460 нм. Анализ полученных результатов показал, что наиболее эффективно АФЛ возбуждается на длине волны 720 нм, которая использовалась в дальнейшем эксперименте.

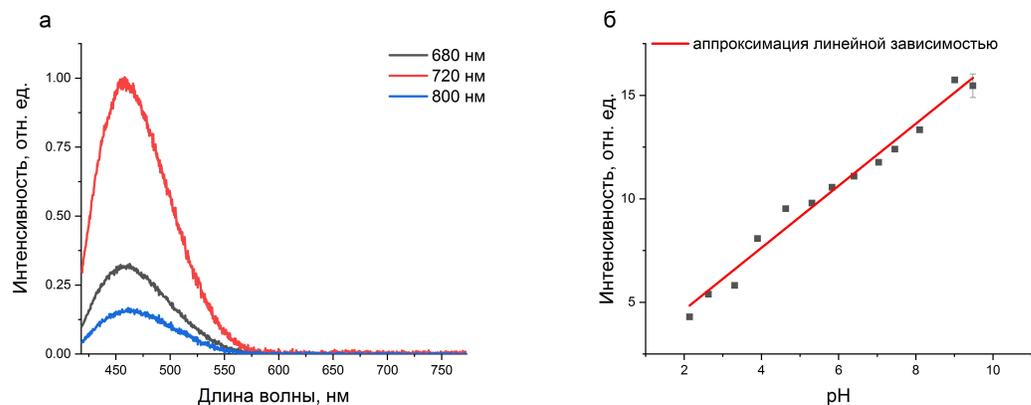


Рис. 1. Спектры ФЛ водных суспензий УТ-СООН в антистоксовой области при возбуждении излучением на трех длинах волн: 680, 720 и 800 нм (а). Зависимость интегральной интенсивности АФЛ УТ-СООН от рН водной суспензии (б).

Экспериментально была получена серия спектров ФЛ УТ в антистоксовой области при различных значениях рН водной суспензии. Диапазон изменения рН составлял от 2 до 10. Из представленных данных (Рис. 1б) видно, что зависимость интегральной интенсивности АФЛ линейным образом зависит от значения водородного показателя среды. По построенной калибровочной зависимости была оценена ошибка определения рН по спектрам АФЛ УТ, которая составила 0.1.

Таким образом, в работе исследована антистоксова ФЛ водной суспензии углеродных точек, поверхность которых была функционализирована карбоксильными группами. Определена длина волны возбуждения АФЛ УТ, при которой наблюдается наиболее интенсивная АФЛ, и получена зависимость интегральной интенсивности АФЛ УТ от водородного показателя водной суспензии УТ. Продемонстрировано, что АФЛ УТ можно использовать для определения рН суспензии с точностью не хуже, чем 0.1 ед. Принимая во внимание, что для возбуждения АФЛ используется излучение с длиной волны 720 нм, что попадает в окно прозрачности биоткани, можно сделать вывод о перспективе использования УТ в качестве внутриклеточных наносенсоров рН.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00138, <https://rscf.ru/project/22-12-00138/>

Список литературы

1. D. Li, C. Liang, E. Ushakova, M. Sun, X. Huang, et. al. Thermally Activated Upconversion Near-Infrared Photoluminescence from Carbon Dots Synthesized via Microwave Assisted Exfoliation // *Small*, vol. 15(50), pp. 1905050, 2019.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНВЕРСНЫХ ОПАЛОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

О. В. Шабанова¹, И. В. Немцев^{2,3,4*}, А. В. Шабанов³

¹СКТБ «Наука» ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, 50/45, г. Красноярск, 660036

²ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, 50, г. Красноярск, 660036

³ИФ им. Л.В. Киренского СО РАН, ул. Академгородок, 50/12, г. Красноярск, 660036

⁴СФУ, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041

*e-mail: ivan_nemtsev@mail.ru

Цель данного исследования заключается в апробации метода применения инверсных опалов (ИО) при подготовке биологических объектов для сканирующей электронной микроскопии. В качестве абсорбирующей подложки использовались ИО из кремнезёма.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) позволяет решать целый ряд научно-исследовательских задач при изучении биологических объектов, таких как клетки, клеточные органеллы, бактерии, вирусы, биогенные макромолекулы и т. д. Такие задачи включают в себя исследование строения, морфологии, химического состава, контактного взаимодействия друг с другом и т.п. [1] СЭМ применяется для исследования морфологии отдельных биообъектов и их групп [2]. СЭМ последовательно сканирует поверхность объекта, регистрируя для каждой его точки такие процессы, как генерация обратно рассеянных электронов, вторичных электронов, характеристического рентгеновского излучения и прочего.

Ключевую роль в электронной микроскопии играет этап подготовки образцов для исследования. Традиционный подход к пробоподготовке биообъектов для электронной микроскопии сводится к повторению природных процессов, проходящих уже миллионы лет. Химическое замещение определённых органических соединений на минеральные является аналогом окаменения. Замена воды воском или эпоксидной смолой похожа на получение янтаря с включениями. Сушка в критической точке близка к мумификации, а метод криофиксации позволяет относительно быстро остановить биохимические процессы в образце и избежать морфологических изменений, присущих химической фиксации (но при этом имеет свои ограничения) [2].

Основами новейших методик, безусловно, являются приборы с концентрированными парами воды в камере наблюдения: парциальное давление газа не даёт кипеть жидкости. К сожалению, в настоящее время указанные приборы не получили широкого распространения из-за высокой стоимости.

Ещё одно направление – использование солей, являющихся жидкими при комнатной температуре. Это тяжёлые органические соединения, не кипящие при вакууме в рабочей камере обычного электронного микроскопа (10^{-2} – 10^{-3} Па). Ионная жидкость, покрывая образец, сохраняет его форму и успешно отводит электрический ток.

Идея отделения биожидкости от взвешенных в ней микроскопических объектов насчитывает не одно десятилетие и успешно реализована в промышленных масштабах. Для электронной микроскопии такой подход позволяет уменьшить интервал ожидания между стадиями «объект в живой среде» – «объект под электронным пучком» до нескольких минут. В связи с этим, особый интерес представляют собой инверсные опалы – неорганические макропористые структуры с размером пор ≥ 50 нм [3].

Цель данной работы заключается в оценке возможности применения ИО в области исследования биологических объектов на примере молочнокислых бактерий и эритроцитов человека.

Следует отметить, что более 80% объёма ИО занимают пустоты, связанные между собой (рис. 1, слева). Под воздействием капиллярных сил окружающая органические образцы жидкость впитывается в макропористую структуру ИО. Поэтому выпарившиеся под вакуумом соли и органические соединения скрыты внутри объёма пористой подложки. Отсутствие кристаллов солей, жировых пятен, углеводов и прочего позволяет наблюдать поверхность клеток без артефактов (рис. 1, справа).

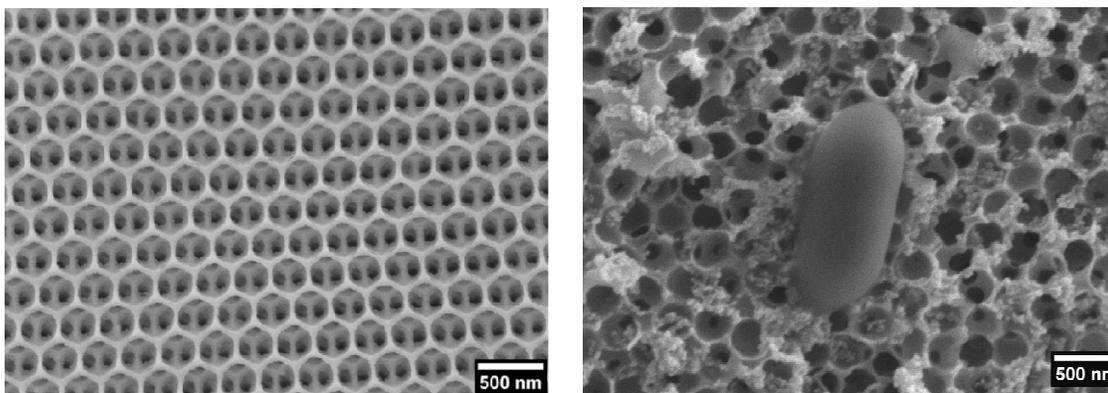


Рис. 1. Слева – РЭМ-изображение ИО на основе оксида кремния (IV). Справа – РЭМ-изображение споры молочнокислой бактерии на поверхности инвертированного опала из кремнезёма.

На рис. 1, справа молочнокислая бактерия не изменила свою форму в вакууме. Зачастую после высыхания можно наблюдать только «сдувшиеся» (мацерированные) оболочки.

В ходе исследования биологических объектов с использованием сканирующей электронной микроскопии изучены морфологические особенности и элементный состав структуры ИО из кремнезёма, молочнокислые бактерии, а также красные кровяные тельца человека. Отработана методика пробоподготовки биологических образцов с применением впитывающего макропористого материала, что даёт возможность сохранить в неизменном виде первоначальную форму и строение биологических структур. Экспериментально показано, что ИО можно использовать в качестве абсорбирующей подложки для подготовки образцов и быстрого анализа без предварительной сушки, химической обработки или температурного воздействия. Это даёт возможность получения высококачественных РЭМ-изображений биологических объектов с высоким разрешением и контрастностью. В то же время, сокращаются временные и финансовые затраты на исследования.

Авторы выражают особую благодарность Красноярскому региональному центру коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН за предоставленное оборудование для обеспечения выполнения данной работы.

Список литературы

1. R. Wang, B. Fang. A combined approach on RBC image segmentation through shape feature extraction // *Math. Probl. Eng.*, vol. 2012, pp. 194953, 2012.
2. А.А. Миронов, Я.Ю. Комиссарчик, В.А. Миронов, Методы электронной микроскопии в биологии и медицине, Самиздат. Санкт-Петербург: Российская академия наук, 1994.
3. Д.В. Калинин, Е.В. Морозов, И.В. Немцев, В.В. Сердобинцева, А.В. Шабанов, О.В. Шабанова // Получение плёночных и трёхмерных фотонных кристаллов на основе диоксидов кремния, циркония и титана, сс. 197–227 монографии «Метаматериалы и структурно организованные среды для оптоэлектроники, СВЧ-техники и нанофотоники», Новосибирск: Издательство Сибирского отделения Российской Академии наук, 2013.

ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Ca²⁺-РАЗРЯЖЕННОГО ФОТОПРОТЕИНА ОБЕЛИНА С СИНТЕТИЧЕСКИМ СУБСТРАТОМ

Е. В. Немцева^{1,2*}, Д. В. Гульнов¹, Е. В. Еремеева^{1,2}, Е.С. Высоцкий²

¹Сибирский федеральный университет

660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79

*E-mail: enemtseva@sfu-kras.ru

²Институт биофизики СО РАН

660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/50

Исследование направлено на поиск биолюминесцентных репортерных систем с улучшенными спектрально-люминесцентными характеристиками. Изучены фотофизические свойства Ca²⁺-разряженного фотопротеина обелина после реакции с синтетическим аналогом субстрата – целентеразином-ν. Получено, что модификация субстрата приводит к возникновению бимодального спектра флуоресценции разряженного обелина с максимумами около 435 и 530 нм, увеличению среднего времени жизни и квантового выхода флуоресценции этого белка.

Фотопротеинами называют устойчивые комплексы специальных белков-ферментов с субстратом и кислородом, в которых внутримолекулярная реакция окисления запускается связыванием ионов Ca²⁺ [1]. В природе Ca²⁺-регулируемые фотопротеины обеспечивают функцию биолюминесценции в разнообразных морских организмах, таких как медузы и ктенофоры. Компактность, структурная стабильность и высокая специфичность фотопротеинов к ионам кальция способствуют широкому применению их в качестве биолюминесцентного репортера в молекулярном анализе и биоимиджинге. При этом актуальной задачей является направленное изменение фотофизических характеристик фотопротеинов, которую решают двумя основными способами – путём модификации полипептидной части (мутация) и/или через использование синтетических аналогов природного субстрата, называемого целентеразином. В данной работе были исследованы фотофизические характеристики Ca²⁺-разряженного фотопротеина обелина после реакции с синтетическим аналогом – целентеразином-ν. Этот аналог отличается наличием дополнительного винилового мостика (–CH=CH–) между фенольным и пиразиновым кольцами целентеразина, то есть увеличенной делокализованной π-электронной системой [2].

Были изучены спектры поглощения и флуоресценции Ca²⁺-разряженного обелина-ν, а также определены компоненты времени жизни и квантовый выход флуоресценции этого белка. Полученные характеристики сравнивали с аналогичными параметрами для обелина с природным флуорофором.

Было установлено, что Ca²⁺-разряженный обелин-ν отличается батохромно сдвинутым спектром поглощения (максимум при 380 нм vs 344 нм у обелина) и пониженным коэффициентом экстинкции. Спектр флуоресценции Ca²⁺-разряженного обелина-ν при возбуждении в длинноволновую полосу поглощения (370 нм) оказался бимодальным с максимумами при 435 и 530 нм, в то время как в спектре флуоресценции обелина различим один основной пик при 515 нм и низкоинтенсивное плечо при 415 нм (вклад <2%) [3].

Глобальный анализ спадов флуоресценции в диапазоне 390–650 нм при импульсном возбуждении показал, что каждая полоса флуоресценции Ca²⁺-разряженных обелинов содержит не менее двух компонент с различимыми временами жизни (τ₁ и τ₂). Спектр флуоресценции нативного обелина характеризуется основной компонентой с τ₁ около 4,6 нс (вклад ~95%) и минорной компонентой с τ₂ около 1,5 нс (вклад ~5%). Коротковолновая полоса испускания обелина-ν содержит компоненты с τ₁ около 2 нс (вклад ~80%) и с τ₂ около 1 нс (вклад ~20%). Длинноволновая полоса флуоресценции обелина-ν характеризуется τ₁ ~ 9 нс (вклад ~60%) и τ₂ ~4,5 нс (вклад ~40%). Максимумы спектров, ассоциированных с временами жизни τ₁ и τ₂, оказались сдвинутыми на

приблизительно 10 нм относительно друг друга.

Был определен квантовый выход флуоресценции Ca^{2+} -разряженных обелинов относительно стандартным методом с использованием хинин сульфата в качестве стандарта. Было получено, что для нативного обелина он составляет 0,19, а для обелина- ν – 0,24 [3].

Таким образом, было показано, что добавление виниленового мостика в природный целентеразин приводит к батохромному сдвигу спектров поглощения и флуоресценции Ca^{2+} -разряженного обелина, увеличению квантового выхода и времени жизни флуоресценции. Такие изменения могут быть, в том числе, результатом расширения делокализованной π -электронной системы флуорофора и повышения общей жесткости молекулы.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования РФ (проект FSRZ-2020-0006) и РФФИ, Правительством Красноярского края и Красноярским краевым фондом науки (проект 20-44-240006).

Список литературы

1. E.S. Vysotski, J. Lee. Ca^{2+} -regulated photoproteins: Structural insight into the bioluminescence mechanism // *Acc Chem Res*, vol. 37, pp. 405–415, 2004.
2. O. Shimomura, B. Musicki, Y. Kishi. Semi-synthetic aequorin. An improved tool for the measurement of calcium ion concentration // *Biochem J*, vol. 251, pp. 405–410, 1988.
3. M.D. Larionova, L. Wu, E.V. Eremeeva, et al. Crystal structure of semisynthetic obelin- ν // *Protein Science*, vol. 31 (2), pp. 454-469, 2022.

ПЕРВИЧНЫЕ ФОТОАКЦЕПТОРЫ, СТРУКТУРНЫЕ МИШЕНИ И СПЕКТРЫ ФОТОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ИНАКТИВАЦИИ SARS-COV-2 СОЛНЕЧНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В. Е. Прокопьев^{1,2}

¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, Российская Федерация, Томск, пр. Академический, д. 2/3*

**E-mail: prokop@ogl.hcei.tsc.ru*

² *Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, ул. Ленина, д. 36*

На основе ежедневных двухлетних наземных измерений спектра солнечного излучения в УФБ диапазоне 280 – 320 нм и ультрафиолетового индекса в г. Томске ((N) 56°29', (E) 84°57') с 26.03.2020 по 26.03.2022 г.г. и их сравнения с числом ежедневных подтвержденных новых случаев COVID-19 для России (40–600 с.ш.) полученных из банка данных ресурсного центра по КВ университета Джонса Хопкинса (CRC-JHU) показано, что заболеваемость этой болезнью для средних широт (с.ш.) Земли имеет сезонный характер и определяется спектром фотобиологической инактивации генома и активного центра S-белка.

Вспышка вирусного заболевания COVID-19 вызванная коронавирусом тяжелого острого респираторного синдрома – SARS-CoV-2 поставила перед врачами и научным сообществом большое количество сложных вопросов, связанных с объяснением причин возникновения, путей и условиях распространения эпидемии и необходимостью разработки и создания новых методов диагностики, лечения и прогноза этой болезни.

Полный жизненный цикл существования вирусных образований можно разделить на две части: первая включает в себя проникновение, размножение и выделение вирусов животными или растительными клетками (жизненный цикл вируса в клетке), вторая – распространение и выживание вируса во внешней среде. Первая часть жизненного цикла вируса изучается и связана с научной и практической медициной, и в настоящей работе не рассматривается. В данной работе изучаются вторая часть жизненного цикла вирусных частиц с точки зрения путей и условий переноса, а также механизмов выживания вирусов во внешней среде в зависимости от физических (метеорологических) параметров последней.

Принято считать, что воздушно-капельный аэрозольный путь распространения вирусных заболеваний человека, наряду с контактным, является одним из основных [1]. Дезинфекция окружающей среды различными способами имеет решающее значение для купирования различных болезней, особенно для болезней, передаваемых воздушно-капельным путём. Как известно из клинической практики, универсальным дезинфицирующим средством является бактерицидное ультрафиолетовое излучение. Преимущества УФ обеззараживания состоит в том, что оно позволяет одновременно дезинфицировать вирусы и бактерии как в воздухе, так и на различных открытых твердых и водных поверхностях. Кроме того, оно очень энергоэффективно. На основании многих натурных и лабораторных исследований было показано, что в основе бактерицидного, цитотоксического и мутагенного эффектов УФ излучения лежит поглощение УФ квантов молекулами ДНК и РНК бактериальной клетки и вирусных образований

В начале 2020 г. было показано, что, инактивация SARS-CoV-2 с помощью излучения УФ-С диапазона представляет собой надежный традиционный метод дезинфекции помещений, медицинского инструмента и оборудования в научных и медицинских учреждениях.

Однако в реальных естественных условиях излучение с длиной волн меньше чем 280 нм (УФ-С) полностью поглощается молекулами озона, кислорода и окислами атмосферных газов уже в верхних слоях атмосферы. Поэтому до поверхности Земли полностью доходит только УФ-А (320–400 нм) и частично излучение УФБ (280–320 нм), которое значительно ослаблено и трансформировано в области длин волн 280–300 нм. Летальные дозы УФ излучения в области 280–400 нм определяются ультрафиолетовым

индексом (УФ-индексом) который можно рассчитать из спектров СИ или найти для конкретного региона обратившись к общим погодным ресурсам в интернете.

Поэтому определение характеристик СИ в УФ-Б области спектра на поверхности Земли и исследование фотофизических механизмов и фотобиологических спектров действия, влияющих на выживаемость бактерий и вирусов в этой области, представляет значительный интерес.

Значение ультрафиолетового индекса на широте города Томска ($56^{\circ}29'$ с.ш. $84^{\circ}56'$ в.д.) и число ежедневных новых заболеваний COVID-19 в РФ с момента возникновения пандемии (26.03.22) по настоящее время (01.04.22) приведено на (рис. 1), время между измерениями составляло 24 часа.

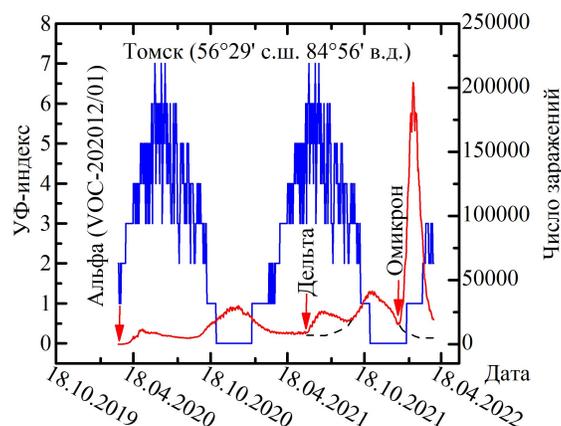


Рис. 1. Сезонный характер поведения заболеваемости COVID-19 в РФ (Россия).

Как видно из (рис. 1) максимальные значения заболеваемости совпадают с минимальными значениями УФ-индекса. Исключения могут составлять только моменты возникновения новых мутаций коронавируса (дельта).

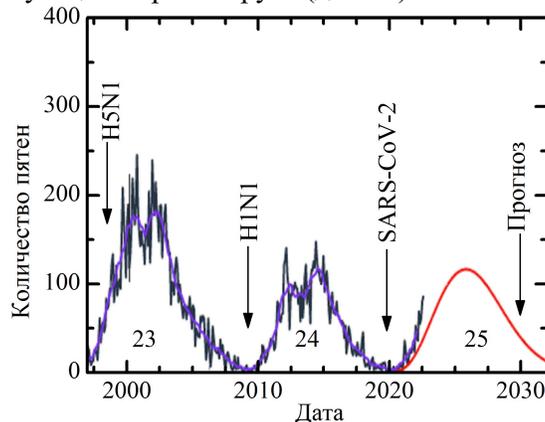


Рис. 2. Циклы солнечной активности и возникновение эпидемий.

На (рис. 2) показаны моменты возникновения новых заболеваний, совпадающие с минимумами солнечной активности, что согласуется с гипотезой, высказанной А. Л. Чижевским [2].

Список литературы

1. R. Xu, B. Cui, X. Duan, et al. Potential diagnostic value and transmission of 2019-nCoV // *Int. J. Oral. Sci.*, vol. 12 (11), pp. 1–6, 2020.
2. А.Л. Чижевский *Земное эхо солнечных бурь* / Москва: Мысль, 352 с., 1973.

О ВОЗМОЖНОСТИ ЗАПУСКА АПОПТОЗА ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ КЛЕТОК В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНЕТИТОВЫХ НАНОЧАСТИЦ, КОНЬЮГИРОВАННЫХ АПТАМЕРАМИ

П. Н. Сёмина^{1*}, И. Л. Исаев², А. Б. Ключанцев³, А. С. Костюков¹, Д. Е. Хренников¹,
А. С. Замай⁴, С. П. Полотов^{1,5}, С. В. Карпов^{1,3,5}

¹Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 28
*E-mail: polina_semina@mail.ru

²Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50/44

³Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50/38

⁴ФГБОУ ВО КрасГМУ им. проф. В.Ф.Войно-Ясенецкого Минздрава России,
660022, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, зд. 1

⁵Федеральный Сибирский научно-клинический центр ФМБА России
660037, Российская Федерация, Красноярск, ул. Коломенская, 26/2

Рассматривается модель запуска апоптоза злокачественных клеток при их селективном взаимодействии с биоконъюгатами на основе наночастиц с магнетитовым ядром и золотой оболочкой, конъюгированной ДНК-аптамерами, в переменном низкочастотном магнитном поле. Показано, что программируемая гибель клеток может происходить при пороговом механическом воздействии агрегированных наночастиц на трансмембранные рецепторные белки, формирующем сигнальный путь и запуск внешнего апоптоза.

Магнитная нанотераностика, включающая в себя наряду с диагностикой также и лечение злокачественных новообразований при помощи магнитных наночастиц (МНЧ), обладает рядом преимуществ по сравнению с методами лазерной фотодинамической терапии, а также химическим и радиационным воздействием на организм. В экспериментах в работе [1] исследовалась эффективность магнитодинамической терапии с использованием наночастиц «ядро-оболочка» с магнетитовым ядром диаметром 12–14 нм и золотой оболочкой с внешним размером до 50 нм и конъюгированными на её поверхности ДНК-аптамерами (синтетическими олигонуклеотидами), обеспечивающими адресную доставку МНЧ к злокачественным клеткам. Воздействие переменным магнитным полем частотой 50 Гц сопровождалось апоптозом злокачественных клеток без их нагрева. Установлено полное подавление карциномы Эрлиха после воздействия магнитным полем в течение 5 часов. В работе [2] аптамер AS-14 к карциноме Эрлиха селективно взаимодействует с фибронектином – белком внеклеточного матрикса, стимулирующим передачу сигналов и участвующим в эволюции клеточного цикла. Фибронектин, в свою очередь, связан с трансмембранным рецепторным белком – интегрином. Он формирует клеточную адгезию и взаимодействие с другими белками внеклеточного матрикса, а также сигнальный ответ, обеспечивающий различные сценарии протекания внутриклеточных реакций (в том числе и апоптоз). Апоптоз, будучи программируемым процессом гибели клеток, регулирующим их численность, реализуется при участии ферментов – каспаз, являющихся экспериментальными маркерами регистрации апоптоза. Специфическое связывание биоконъюгата со злокачественной клеткой в условиях переменного магнитного поля, не вызывающее гипертермического эффекта, обеспечивает запуск апоптоза по внутриклеточным сценариям в ответ на внешний стимул. Связанный с аптамером фибронектин при соединении с интегрином обуславливает изменение его конформационного состояния [3, 4], а присутствие МНЧ во внеклеточном матриксе способствует механическому воздействию на интегрин. Превышение порогового значения силы (4 пН) запускает процесс апоптоза, что подтверждено результатами работ [5-7].

Реализация механического воздействия возможна через различные конфигурации магнитных наночастиц, обладающих сохраняющимся постоянным магнитным диполь-

ным моментом, и может включать в себя МНЧ «ядро-оболочка», димеры, состоящие из золотых и магнитных наночастиц, а также же смесь отдельных золотых и магнитных наночастиц, образующихся в гетерогенных гидрозолях. Методом броуновской динамики с использованием реалистичных парных потенциалов межчастичного взаимодействия показано, что частицы магнетита, сохраняющие собственный магнитный дипольный момент, благодаря дальнедействующим диполь-дипольным взаимодействиям, могут образовывать многочастичные агрегаты, закрепленные на наночастицах золота. При этом взаимодействие ДНК-аптамера с наночастицей золота обеспечивается с помощью короткого фрагмента олигонуклеотида (праймера). Селективное связывание ДНК-аптамера со злокачественной клеткой обусловлено молекулярным сродством с определенным доменом фибронектина, в то время как другой домен фибронектинового волокна взаимодействует с сайтом связывания, располагающимся на рецепторе интегрина. Образование агрегатов из ориентационно-упорядоченных магнитных наночастиц вокруг золотой частицы сопровождается: а) ростом суммарного магнитного дипольного момента агрегата, способствующего увеличению силы воздействия на трансмембранный белок; б) компенсацией тепловых флуктуаций магнитного дипольного момента и его сохранением в одиночных суперпарамагнитных наночастицах размером порядка 15 нм. Отметим, что сохранение магнитного дипольного момента у одиночных частиц возможно при размерах не менее 25 нм. Дополнительные взаимодействия магнитных моментов в условиях их упорядоченности создают коллективное магнитное поле, которое значительно повышает барьер перемагничивания суперпарамагнитных наночастиц меньшего размера, что позволяет сохранить амплитуду магнитного дипольного момента и придает им устойчивые ферримагнитные свойства.

Показано, что воздействие на механорецепторы клетки, позволяющее запустить апоптоз, оцениваемое пороговым значением силы 4 пН, невозможно со стороны одиночных магнетитовых наночастиц в условиях, соответствующих реальному эксперименту.

Список литературы

1. I.V. Belyanina, T.N. Zamay, G.S. Zamay, et.al. In vivo cancer cells elimination guided by aptamer-functionalized gold-coated magnetic nanoparticles and controlled with low frequency alternating magnetic field // *Theranostics*, vol. 7 (13), pp. 3326-3337, 2017.
2. O.S. Kolovskaya, T.N. Zamay, A.S. Zamay, et.al. DNA-aptamer/protein interaction as a cause of apoptosis and arrest of proliferation in Ehrlich ascites adenocarcinoma cells // *Biochemistry (Moscow) Supplement Series A: Membrane and Cell Biology*, vol. 8, pp. 60-72, 2014.
3. Y. Su, W. Xia, J. Li, et.al. Relating conformation to function in integrin $\alpha 5 \beta 1$ // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113 (27), pp. E3872-E3881, 2016.
4. Y. Zhang, M. Chen, S. Venugopal, et.al. Isthmin exerts pro-survival and death-promoting effect on endothelial cells through $\alpha v \beta 5$ integrin depending on its physical state // *Cell Death & Disease*, vol. 2 (5), p. e153, 2011.
5. D. Kilinc, A. Lesniak, S.A. Rashdan, et.al. Mechanochemical Stimulation of MCF7 Cells with Rod-Shaped Fe–Au Janus Particles Induces Cell Death Through Paradoxical Hyperactivation of ERK // *Advanced Healthcare Materials*, vol. 4 (3), pp. 395-404, 2014.
6. D. Kilinc, C.L. Dennis, G.U. Lee, et.al. Bio-Nano-Magnetic Materials for Localized Mechanochemical Stimulation of Cell Growth and Death // *Advanced Materials*, vol. 28 (27), pp. 5672-5680, 2016.
7. E. Puklin-Faucher, M. Gao, K. Schulten, et.al. How the headpiece hinge angle is opened: new insights into the dynamics of integrin activation // *Journal of Cell Biology*, vol. 175 (2), pp. 349-360, 2006.

ИЗУЧЕНИЕ КОНФОРМАЦИИ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕМОГЛОБИНА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТРАНСМЕМБРАННОГО ПОТЕНЦИАЛА ЭРИТРОЦИТОВ

О. В. Слатинская¹, Г. В. Максимов¹

¹²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12
*E-mail: slatolya@mail.ru

Методы оптической спектроскопии позволяют получить данные о пространственных и структурных модификациях белков при физиологическом воздействии в реальном режиме времени. Изучение механизмов и последовательности конформационных изменений белковой глобулы позволит получить новые сведения об упорядоченности гемоглобина в эритроците и молекулярных механизмах транспорта кислорода.

Важной областью физиологии крови является изучение молекулярного механизма изменения скопления гема и глобина в эритроцитах. Гемоглобин (Hb) играет ключевую роль в регуляции внутриклеточных процессов в эритроцитах и действует в комплексе с цитоплазматическим доменом белка полосы 3 (AE1), обеспечивая фиксацию кислорода в клеточной мембране. Кислородтранспортная способность Hb зависит от его конформации, состояния плазматической мембраны, объема клетки, мембранного потенциала, а также от свойств цитоплазмы [1]. Важно отметить, что при гипоксии наблюдаются изменения содержания других мембраносвязанных цитоплазматических белков. Эти изменения могут лежать в основе не только механизмов, поддерживающих изменения структурной целостности мембраны, но и механизмов, изменяющих упорядочение молекул гемоглобина в цитоплазме клетки [2].

С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния, лазерной интерференционной микроскопии и пикосекундной флуоресцентной спектроскопии оценивали размеры и преломляющие свойства эритроцитов, а также сродство их гемоглобина к кислороду. Изменения электрофоретической подвижности, трансмембранного потенциала (включая потенциал липидов и белков), сопровождающиеся изменением конформации гема и глобина, включая олигомеризацию комплексов гемоглобина.

Установлено, что изменения конформации гема сопровождаются различиями в конформации гемоглобина как в клетке, так и в растворе. Вероятно, изменение конформации гема является важным фактором эффективного переноса кислорода между окси- и дезокси-Hb при связывании с AE1 в плазматической мембране, а также при образовании олигомерных кластеров Hb в цитоплазме эритроцитов, которые способствуют к конформационным изменениям транспорта гема и O₂.

Связывание O₂ с комплексом AE1 приводит к изменению конформации связанного гема и близлежащих к нему аминокислот дезоксигемоглобина. При этом наблюдается снижение плотности упаковки глобина за счет колебания метильных радикалов поверхностного слоя аминокислот глобина. Увеличение доли O₂ в пробе снижает плотность упаковки глобина. Так же, изменения триптофановой флуоресценции в внутриклеточного Hb коррелируют с изменениями ζ-потенциала клетки, что свидетельствует о зависимости конформации глобина от поверхностного потенциала.

Исследование поддержано РФФИ №20-34-90073.

Список литературы

1. Atkins C. G. et al. Raman spectroscopy of blood and blood components // Applied spectroscopy, vol. 71 (5), pp. 767-793, 2017.
2. Huang Y. X. et al. Human red blood cell aging: correlative changes in surface charge and cell properties // Journal of cellular and molecular medicine. Vol. 15 (12), pp. 2634-2642, 2011.

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЕ УСИЛЕНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ GFP, ИНДУЦИРОВАННОЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

С. А. Вьюнышева^{1,2}, С. А. Мысливец^{1,3}, Е. В. Еремеева⁴,
Е. С. Высоцкий⁴, И. Н. Павлов², А. М. Вьюнышев^{1,3*}

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок д. 50, стр. 38*

²*Институт леса им. В.Н. Сукачева, ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок д. 50, стр. 28*

³*Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 28*

⁴*Институт биофизики, ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок д. 50, стр. 50*

*E-mail: vyunishev@iph.krasn.ru

В настоящем исследовании предпринята попытка экспериментального исследования усиления лазерно-индуцированной флуоресценции зеленого флуоресцентного белка. Показано, что возбуждение помещенного в микрорезонатор раствора зеленого флуоресцентного белка фемтосекундными лазерными импульсами приводит к значительному усилению флуоресценции несмотря на неоптимальную конфигурацию эксперимента. Полученные результаты представляют интерес для развития потенциальных биофотонных приложений.

На сегодняшний день основными методами биоимиджинга являются различные микроскопические методы анализа, такие как флуоресцентная и конфокальная микроскопия. Зачастую данные методы используются совместно и дополняют друг друга. Для изучения биологических систем представляет интерес лазерно-индуцированная флуоресценция исследуемых объектов. Данный метод позволяет повысить полезный сигнал путем селективного возбуждения люминофора, что является важным для исследования объектов, обладающих слабовыраженными люминесцентными свойствами. Усиление флуоресцентного сигнала в различных биоанализах позволит снизить пределы обнаружения биомаркеров с низкой концентрацией в образце [1]. В молекулярной биологии для изучения транскрипционных и трансляционных механизмов широко применяется репортерный ген зеленого флуоресцентного белка (GFP) [2,3], экспрессия которого выражается в появлении флуоресцентного свечения зеленого цвета, интенсивность которого определяется концентрацией флуорофора. Таким образом, представляет интерес усиление лазерно-индуцированной флуоресценции GFP в микрорезонаторе для улучшения характеристик биосенсоров и повышения их чувствительности.

GFP характеризуется максимумом поглощения вблизи 488 нм и максимальным выходом флуоресценции в диапазоне 510–525 нм. Раствор GFP помещался в микрорезонатор типа Фабри – Перо, состоящий из двух диэлектрических зеркал с высоким коэффициентом отражения и фотоннозапрещенной зоной в области 450–620 нм. Оптическая накачка осуществлялась импульсным фемтосекундным лазерным излучением на длине волны 400 нм (вторая гармоника лазера на титан-сапфире, 80 МГц, 100 фс). Средняя мощность лазерного излучения варьировалась в пределах 1–30 мВт. В эксперименте наблюдалось свечение раствора GFP в микрорезонаторе (Рис. 1а). Спектральные измерения свидетельствуют об увеличении сигнала флуоресценции на спектральных частотах, соответствующих резонаторным модам, а также о подавлении фоновой флуоресценции (Рис. 1б). Усиление сигнала флуоресценции в рассматриваемой системе наблюдалось несмотря на то, что конфигурация системы была неоптимальной с точки зрения согласования длины волны возбуждающего излучения и полосы поглощения GFP, а также положения фотоннозапрещенной зоны относительно спектра флуоресценции GFP. Оптимизация указанных характеристик позволит повысить выход флуоресценции GFP. Спектры флуоресценции GFP, приведенные на Рис. 1б, свидетельствуют о сужении пиков, соответствующих микрорезонаторным модам, при увеличении мощности накачки.

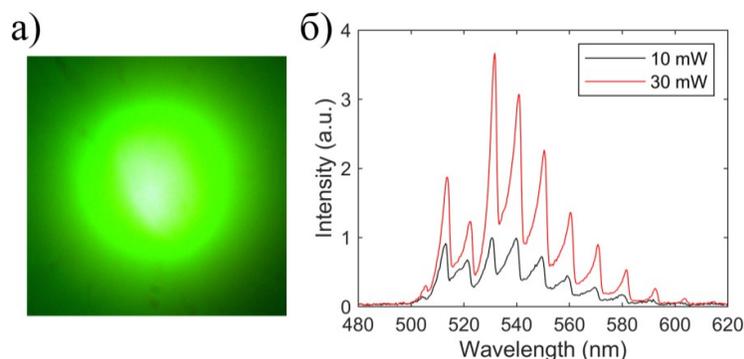


Рис.1.а) Свечение GFP в микрорезонаторе; б) спектр флуоресценции GFP в резонаторе Фабри – Перо при различных уровнях мощности накачки

В результате работы получено усиление флуоресценции GFP в микрорезонаторе Фабри – Перо при возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами. Техники лазерно-индуцированной флуоресценции могут привести к разработке новых технологий получения гиперспектральных изображений, а также развитию методов высококонтрастной специфической микроскопии и биосенсорики.

Список литературы

1. Pokhriyal, A., Lu, M., Ge, C. and Cunningham, B.T. (2014), Coupled external cavity photonic crystal enhanced fluorescence. *J. Biophoton.*, 7: 332-340.
2. Anne-Lyse Ducrest, Mario Amacker, Joachim Lingner, Markus Nabholz, Detection of promoter activity by flow cytometric analysis of GFP reporter expression, *Nucleic Acids Research*, Volume 30, Issue 14, 15 July 2002, Page 65.
3. Lee, J.-Y., Colinas, J., Wang, J.Y., Mace, D., Ohler, U., Benfey, P.N., 2006 Apr 11. Transcriptional and posttranscriptional regulation of transcription factor expression in *Arabidopsis* roots. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103 (15), 6055–6060.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРОИЗВОДНЫХ ЭПИДЕРМИСА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИСКРОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А. В. Боровский^{1*}, А. Ю. Майор^{1,2}, С. С. Голик¹, М. Ю. Бабий¹, А. С. Анкушев¹

¹Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

*E-mail: Ifitfizik@gmail.com

²Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук

690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Радио 5

Проведены экспериментальные исследования спектральных характеристик плазмы, генерируемой на поверхности волос человека при различных условиях фокусировки (линзами с фокусным расстоянием 50 мм, 100мм, 150 мм) лазерными импульсами длительностью (10–20 нс) в режиме анализа элементного и молекулярного состава поверхности. Получены результаты по определению минимальных и максимальных уровней энергии лазерных импульсов (5 мДж, 10 мДж, 20 мДж, 35 мДж, 50 мДж) для различных эмиссионных линий химических элементов в исследуемых образцах.

Содержание элементов в производных эпидермиса может рассматриваться как показатель уровня элемента в других тканях и отражать минеральный обмен в организме [1,2]. Биологические образцы, в частности кости, зубы и волосы, содержат информацию о среде обитания [12], питании и других условиях окружающей среды. В настоящее время существует множество способов определения химических элементов и их распределения в живых организмах [3-5]. Один из перспективных методов определения химического состава биологических объектов в режиме реального времени – метод лазерно-искровой спектроскопии (ЛИС) [6,7]. К преимуществам ЛИС относят отсутствие подготовки проб для анализа, оперативность, малое разрушающее действие на образец, дистанционность, широкий спектр одновременно детектируемых элементов. В норме в состав человеческого волоса входят следующие элементы (расположены по мере уменьшения их концентрации в волосе): углерод, кислород, азот, сера, водород, хлор, кальций, кремний, натрий, калий, цинк, фосфор, магний, свинец, бром, железо и др [13]. Волосы во многом более доступный материал для анализа чем другие твердые или мягкие ткани или биологические жидкости. Кровь и моча обычно используются в качестве исследуемых образцов, однако отражают статус микроэлементов только на момент получения образца [14]. Человеческие волосы растут со скоростью примерно 1 см в месяц, что позволяет осуществлять долгосрочный мониторинг [17] прошлого и недавнего воздействия лечебных препаратов.

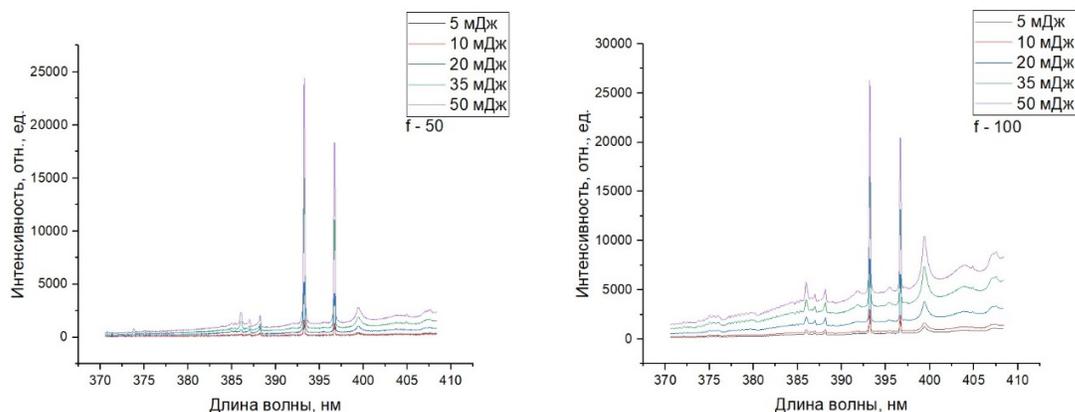


Рис. 3. Спектр лазерной плазмы, генерируемой на поверхности волос

Существует ряд задач, где требуется определять изменение содержания элементов биообразца с привязкой ко времени его роста. Для волос это возможно делать если исследовать их по длине, без пробоподготовки. Для таких задач надо провести исследования формирования ЛИС спектров, оптимальных условий их формирования и разработать блок подачи одиночного волоса для метода ЛИС.

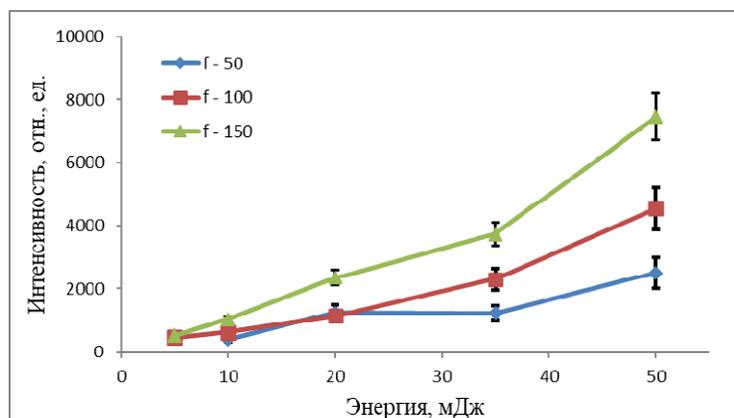


Рис. 4. График отношения сигнал/дисперсия

В ходе работы были проведены экспериментальные исследования спектральных характеристик плазмы, генерируемой на поверхности волос человека при различных условиях фокусировки (50 мм, 100мм, 150 мм) лазерными импульсами с энергией (5 мДж, 10 мДж, 20 мДж, 35 мДж, 50мДж) для различных эмиссионных линий химических элементов в исследуемых образцах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания №0657-2020-0003.

Список литературы

1. R. Chitturi, V.R. Baddam, et.al. A review on role of essential trace elements in health and disease // J. Dr. NTR Univ. Health Sci., vol. 4, pp. 75-85, 2015.
2. M. Bahreini, S.H. Tavassoli. Possibility of thyroidism diagnosis by laser induced breakdown spectroscopy of human fingernail // J. Lasers Med. Sci., vol. 3, pp. 127-131, 2012.
3. W. Binggan, L. Yonghua, et.al. Rare earth elements in human hair from a mining area of China // Ecotoxicol. Environ. Saf., vol. 96 (1), pp. 118-123, 2013.
4. F. Musshoff, B. Madea. Analytical pitfalls in hair testing // Analytical and Bioanalytical Chemistry, vol. 388 (7), pp. 1475–1494, 2007.
5. M. Tran, S. Sun, et.al. Determination of C : H : O : N ratios in solid organic compounds by laser-induced plasma spectroscopy // J. Anal. Atomic Spectrom., vol. 16 (6), pp. 628–632, 2001.
6. A. Miziolek, V. Palleschi, I. Schecter. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) fundamentals and applications / UK: Cambridge University Press, Cambridge, 620 p., 2006.
7. D.A. Cremers, L.J. Radziemski. Handbook of laser-induced breakdown spectroscopy / Wiley & Sons, Chichester, 275 p., 2006.
8. Электронный ресурс. Режим доступа: URL: http://www.knowledgedoor.com/2/elements_handbook/element_abundances_in_human_hair.html
9. H. Koichi, S. Rieko et.al., Hair analysis for drug abuse // Journal of Health Science, vol. 57 (60), pp. 472-487, 2011.

КАЧЕСТВЕННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛОС ЧЕЛОВЕКА МЕТОДОМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ИСКРОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А. В. Боровский^{1*}, А. Ю. Майор^{1,2}, С. С. Голик¹, Ю. С. Толстоногова², Д. Ю. Проценко¹

¹Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

*E-mail: Ifitfizik@gmail.com

²Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук

690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Радио 5

Получены данные интенсивностей линий химических элементов в лазерной плазме, генерируемой на поверхности человеческих волос импульсами длительностью 40 фс на длине волны 800 нм при острой фокусировке. Показано, что основные химические элементы возможно зарегистрировать относительно простыми компактными и не дорогими спектрометрами, типа Maya 2000 Pro. По временно-разрешенным спектрам, полученным с помощью ICCD камеры получены контуры эмиссионных линий идентифицированные, как линии углерода (С I 193.09 нм, 247.86 нм), кальция (Са II 315.92 нм, 317.94, нм 393,41 396,87 Са I 422,67), натрия (Na I 588.99 нм, 589.59 нм), магния (Mg II 259, 54 нм, 280.3 нм; 285.3 нм), водорода (H 656 нм), цинка (Zn I 213.85 нм, Zn II 202,57 нм 206.22 нм) и меди (Cu I 324.76 нм, 327.41 нм).

Исследование возможностей использования лазерных импульсов фемтосекундной длительности при анализе волос человека проводилось на экспериментальном стенде, схема которого представлена на (рис. 1).

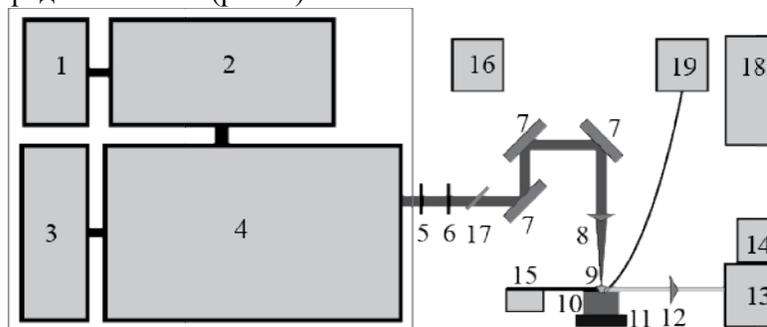


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. 1, 3 – лазеры накачки Millennia Pro и Empower соответственно; 2 – фемтосекундный Ti:sapphire лазер Tsunami, 4 – Ti:sapphire усилитель Spitfire Pro 40F; 5 – полуволновая пластинка в поворотной держалке, 6 – кристалл ВВО на откидной поворотной держалке, 7 – система поворотных диэлектрических зеркал для основной и второй гармоники лазера, 8 – фокусирующая оптика, 9 – образец, 10, 11 – система удержания и позиционирования образца, 12 – собирающая оптика, 13 – спектрограф SpectraPro 2500i (Princeton Instruments), 14 – ICCD камера с усилителем яркости PicoStar HR (LaVision); 15 – аспиратор; 16 – автокоррелятор, 17 – диэлектрический светоделитель с коэффициентом отражения 3% на откидной держалке, 18 – персональный компьютер, 19 – спектрометр Maya 2000Pro.

Излучение лазерной плазмы, генерируемой на поверхности исследуемого образца, направлялось на входную щель спектрографа SpectraPro2500i, сопряженного с ICCD камерой PicoStar HR. Исследование временной эволюции спектральных линий осуществлялось с помощью платы пикосекундных задержек DEL350, входящей в состав ICCD камеры. В качестве дополнительного спектрометра, обеспечивающего одновременную регистрацию спектров в спектральном диапазоне 200–800 нм использовался малогабаритный спектрометр Maya2000 Pro, имеющий оптоволоконный ввод излучения.

Спектры излучения плазмы на поверхности волос человека, генерируемые при фокусировке линзой с фокусным расстоянием 50,2 мм, импульсами длительностью 40 фс, энергией 480 мкДж, на длине волны 800 нм представлены на рис. 2. Данные спектры регистрировались спектрометром Maya2000 Pro с начала действия лазерного импульса на образец и до полного его прожига.

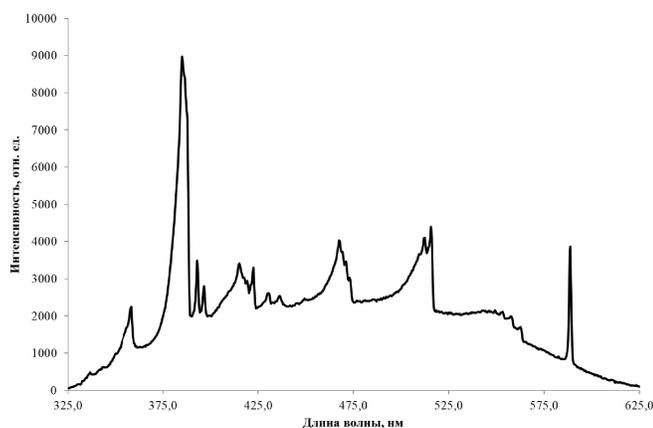


Рис. 2. Спектр лазерной плазмы, генерируемой на поверхности волос

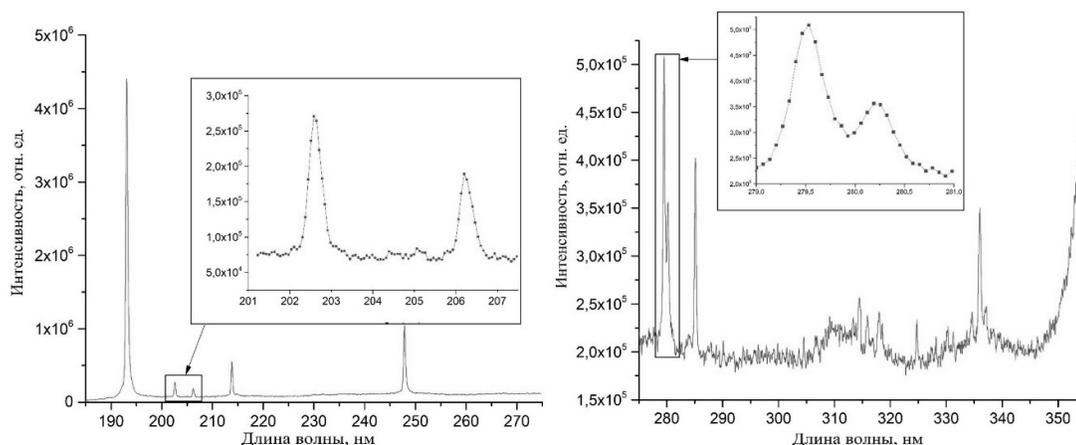


Рис. 3. Спектр лазерной плазмы, генерируемой на поверхности волос, спектральный диапазон 185–275 нм (слева) и 275–355 нм (справа)

На рис. 3 представлены спектры лазерной плазмы, генерируемой на поверхности волос человека, полученные на спектрометре Spectra Pro 2500 и ICCD камере. Время экспозиции для одиночного импульса составляло $t_g = 100$ нс и накопление 6 с при частоте повторения импульсов 1 кГц. Задержка регистрации относительно лазерного импульса составляла $t_d = 10$ нс.

Из рис. 3 видно, что данная конфигурация системы регистрации позволяет получить высокое спектральное разрешение, которое полностью обеспечивает идентификацию регистрируемых спектральных линий. Использование временного стробирования позволяет значительно снизить регистрацию фонового излучения плазмы, что очень хорошо заметно в сравнении с (рис. 2).

По временно-разрешенным спектрам, полученным с помощью ICCD камеры получены контуры эмиссионных линий идентифицированные, как линии углерода (C 193.09 нм, 247.86 нм), кальция (Ca II 315.92 нм, 317.94 нм, 393.41 нм, 396.87 нм, Ca I 422.67 нм), натрия (Na I 588.99 нм, 589.59 нм), магния (Mg II 259.54 нм, 280.30 нм, 285.30 нм), водорода (H 656.00 нм), цинка (Zn I 213.85 нм, Zn II 202.57 нм, 206.22 нм) и меди (Cu I 324.76 нм, 327.41 нм).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания №0657-2020-0003.

ОЦЕНКА ОРГАНИЧЕСКОГО И МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ЭМАЛИ ЗУБОВ ПОСЛЕ ОТБЕЛИВАНИЯ МЕТОДОМ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

О.О. Фролов^{1*}, Е.В. Тимченко¹, П.Е. Тимченко¹, О.А. Магсумова²,
Л. Т. Волова², М.А. Постников²

¹Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева
443086, Российская Федерация, Самара, ул. Московское шоссе, д. 34
*E-mail: frolovaleh@gmail.com

²Самарский государственный медицинский университет
443099, Российская Федерация, Самара, Чапаевская, д.89

Оценка спектрального состава эмали до и после процедуры отбеливания проводилась методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Обследованы пациенты в возрасте от 18 до 32 лет. Все образцы были разделены на две группы: эмаль до и после процедуры отбеливания зубов. Выявлено спектральное изменение состава эмали после процедуры отбеливания зубов, связанное с изменением минерально-органического состава.

Несмотря на постоянное совершенствование и модификацию методов лечения окрашивания зубов, вопрос окрашивания зубов по-прежнему актуален. Одним из методов достижения высокого эстетического эффекта является отбеливание зубов [1].

Процедура отбеливания зубов вызывает качественное и количественное изменение минерального обмена ротовой жидкости, нарушение структурной организации эмали зубов, динамики микроциркуляции пульпы, может вызвать повышенную чувствительность зубов [2].

В состав современных отбеливающих гелей входят перекисные соединения, которые в результате химической реакции распадаются на свободные радикалы, обладающие окислительной способностью и перемещающиеся из эмали в дентин, вызывая нарушение структуры молекул коллагена, состоящего на 95% из белка в дентине. Согласно некоторым исследованиям, атомарный кислород вызывает изменения в молекуле коллагена в первые десять минут после контакта отбеливающего средства с тканями зуба [3].

Материалами исследования являлась эмаль зубов 9 пациентов. Исследуемые образцы поделены на 2 группы: I – до отбеливания (36 спектров КР), II – после отбеливания (78 спектров). Исследования проводились *in vivo* с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния.

Выявлено, что спектры комбинационного рассеяния имеют ярко выраженные спектральных различия между спектрами I группы и группы после отбеливания. Основные различия выражены на линиях гидроксиапатита (рис. 1): ~432 (PO_4^{3-} (ν_2) (P–O Symmetric stretch) (phosphate of HA)), 584-593 (PO_4^{3-} (ν_4) (P–O Symmetric stretch)), 955-961 (PO_4^{3-} (ν_1) (P–O symmetric stretch)), ~1045 (PO_4^{3-} (ν_3) (P–O asymmetric stretch)) и ~1075 cm^{-1} (CO_3^{2-} (ν_1) B-type substitution (C–O in-plane stretch)).

Для повышения информативности полученных спектров КР был произведен нелинейный регрессионный анализ спектров, состоящий в их разложении на спектральные линии.

Для относительной количественной оценки компонентного состава были использованы нормированные амплитуды разделенных линий комбинационного рассеяния. Анализ полученных данных произведен в программной среде Wolfram Mathematica 12.2 методом логистической регрессии.

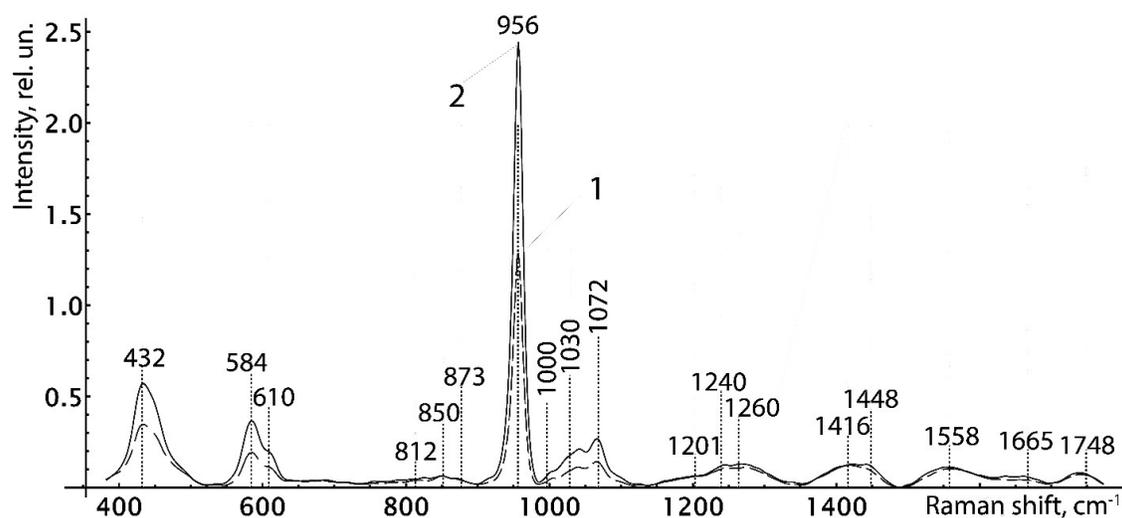


Рис. 1. Усредненные спектры КР исследуемых образцов эмали.
1 – до отбеливания, 2 – после отбеливания

В результате анализа методом логистической регрессии составлена модель дискриминации характерных изменений интенсивностей линий КР для эмали зубов после отбеливания. Процент правильно классифицированных измерений при анализе тестовой выборки составил 91%. Рассчитанные точность и специфичность метода составили 90 % и 89 % соответственно.

Итоговая проверка осуществлялась на выборке из дополнительных 33 измерений, отобранные случайным образом и не участвовавшие при анализе. Модель позволяет с точностью в 91 % классифицировать образцы до и после отбеливания. Причем группа образцов «до отбеливания» определяется с точностью 100% и 86% – «после отбеливания».

Расширенный спектральный анализ с использованием разделения на спектральные линии и хемометрических методов, позволяет выявить основные различия в составе образцов. Исследованные различия в линиях комбинационного рассеяния могут быть в дальнейшем использованы для экспресс-оценки степени изменения минерал-органического состава в процессе отбеливания.

Список литературы

1. O. A. Magsumova, T. M. Tkach, M. A. Postnikov, E. A. Ryskina, M. S. Korchagina, S. E. Dudina, V. A. Polkanova, I. I. Odnoletkova, "Etiopathogenetic aspects of the occurrence of dental discolouration" *Clinical Dentistry*, vol. 1(97), pp. 22-29, 2021.
2. O. A. Magsumova, E. A. Riskina, M. A. Postnikov, T. M. Tkach, V. A. Polkanova, "The change of sensitivity of hard tissues of teeth after the in-office whitening procedure" *The institute of dentistry*, vol. 3(88), pp. 62-63, 2020.
3. O. V. Denga, O. V. Nepryakhina, E. M. Denga, "Biophysical and optical parameters of oral liquid and hard tissue of teeth with whitening" *Medical News*, vol. 1(244), pp. 60-62, 2015.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ АРАБИНОГАЛАКТАНА И РОДАМИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

Е.В. Хименко¹, Е.А. Слюсарева¹, Н.Ю. Васильева¹, Н.В. Слюсаренко¹

¹Сибирский федеральный университет
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
E-mail: katrinfly@bk.ru

Новые флуоресцирующие супрамолекулярные комплексы из сульфата арабиногалактана и родаминовых красителей получены методом ионного обмена. Молекулярное соотношение полимер:краситель составляет около 1:100. Квантовый выход флуоресценции комплексов находится в диапазоне 10–20%, что является достаточным для использования в флуоресцентной микроскопии.

Флуоресцентно-меченые полимеры применяются для создания маркеров, сенсоров [1], в системах доставки лекарств. Супрамолекулярные комплексы из полимера и флуорофора, полученные нековалентным связыванием конъюгатов, могут использоваться как сенсоры благодаря их чувствительности к изменению ионной силы, рН, температуры.

В работе впервые синтезированы новые флуоресцирующие супрамолекулярные комплексы на основе разветвленного полимера сульфата арабиногалактана и двух родаминовых красителей (родамин В и родамин 6G) методом ионного обмена [2] и исследованы их спектральные свойства методами абсорбционной, стационарной и разрешенной во времени флуоресцентной спектроскопии.

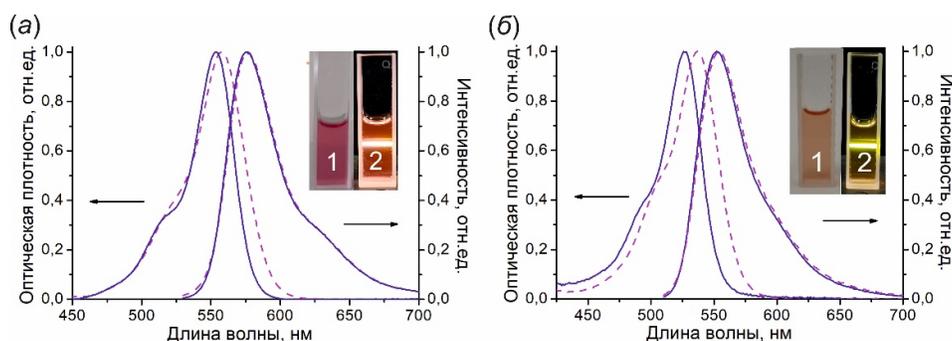


Рис. 1 Спектры поглощения и флуоресценции родамина В (а) и родамина 6G (б).
Сплошная линия – краситель в воде, пунктирная линия – супрамолекулярный комплекс.
Вставка: супрамолекулярный комплекс при дневном свете (1) и в темноте при возбуждении УФ-лазером (2).

На рис. 1 показаны спектры поглощения и флуоресценции красителей в воде и в составе супрамолекулярного комплекса с концентрацией 1,25 % (масс.). При связывании красителя с полимером происходит красный сдвиг и изменение спектра поглощения для обоих красителей. Изменение спектра флуоресценции не было зафиксировано. Значение квантового выхода оценено относительным методом и для супрамолекулярных комплексов составило 15% и 17% для родамина В и родамина 6G соответственно. В качестве основных механизмов связывания красителей с биополимером обсуждаются электростатическое связывание и гидрофобные взаимодействия. В работе показано, что для красителей, связанных с биополимером, наблюдается статический тип тушения флуоресценции. Стехиометрическое соотношение краситель:полимер составляет около 1:100. Полученные супрамолекулярные комплексы могут найти применение для флуоресцентных исследований, а также для создания систем доставки лекарственных средств.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проекты №. FSRZ-2020-0008 и МК-995.2022.1.2.

Список литературы

1. TX. Yang, YJ. Zuo, Y. Zhang, ZM. Gou, WY. Lin. Novel polysiloxane-based rhodamine B fluorescent probe for selectively detection of Al³⁺ and its application in living-cell and zebrafish imaging // Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc., vol 216, pp. 207-213, 2019.
2. Н.Ю. Васильева, Е.В. Хименко, Е.А. Слюсарева, Н.В. Слюсаренко, Б.Н. Кузнецов. Способ получения флуоресцентных производных арабиногалактана. Патент РФ № 2768707, 2022.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ ПРИ ПАРОДОНТИТЕ

П.Е. Тимченко¹, Е.В. Тимченко¹, И.В. Бажутова², Л.Т. Волова², О. О. Фролов¹,
А.Ю. Ионов^{1*}

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
443086, Российская Федерация, Самара, Московское ш., д. 34

*E-mail: artem.ionov.95@mail.ru

²Самарский государственный медицинский университет
443001, Российская Федерация, Самара, ул. Арцыбушевская, д. 171

Аннотация – В работе представлены результаты исследований костной ткани зубов при пародонтите и в норме. В качестве метода оценки влияния пародонтита на костную ткань зубов был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния. Был проведен хемометрический анализ спектров комбинационного рассеяния костной ткани в норме и при пародонтите. Выявлены спектральные изменения костной ткани зубов. Установлено, что при пародонтите, в костной ткани, происходят спектральные сдвиги в органическом матриксе и изменения спектров КР минеральной составляющей, что является следствием резорбции костной ткани при данном заболевании.

Пародонтит — заболевание воспалительного характера, сопровождающееся деструктивным разрушением всех тканей пародонта [1]. Воспалительные заболевания пародонта (ВЗП) по-прежнему составляют актуальную, не до конца решенную проблему современной стоматологии в связи с сохраняющимся высоким уровнем распространенности гингивита и пародонтита у населения различных популяций. У жителей Российской Федерации частота воспалительных заболеваний пародонта достигает 62–94%, причем у лиц в возрасте 18–24 лет, проживающих в различных регионах России, распространенность ВЗП составляет от 83,6% до 96,6%. [2]. Пародонтит является одним из факторов резорбции костной ткани зуба [3]. Так же пародонтит приводит к нарушению минерализации костных тканей зубов, разрушению органической матрицы с образованием резорбционных лакун. [4,5]. Есть множество методов оценки состояния зубов при пародонтите, такие как, ортопантомография, рентгенография, КТ и другие [6]. Однако данные методы не позволяют оценить относительный состав костной ткани зубов, что в дальнейшем могло бы способствовать корректировке тактики лечения тканей пародонта.

Наибольшее распространение среди методов исследований тканей пародонта получили оптические методы исследований, т. к. являются оперативными и неинвазивными методами анализа. Среди оптических методов исследования биотканей широкое распространение в решении биомедицинских задач получил метод Рамановской спектроскопии [7, 8, 9].

Целью данной работы являлось исследование спектральных изменений костной ткани при пародонтите.

В качестве объектов исследований была использована костная ткань пациентов, обоего пола, возрастной группы от 47 до 58 лет с установленным диагнозом пародонтит. Диагноз пародонтит был установлен клинически и при анализе компьютерной конусно-лучевой томографии (КТ) (код заболевания по МКБ-10 (1997 г.) – K05.3). Костная ткань в норме была получена при экстрагировании восьмых зубов.

Образцы были разделены на две группы: 1 группа – костная ткань в норме и 2 группа – костная ткань при пародонтите.

В качестве основного метода оценки костной ткани в норме и при пародонтите был использован метод Рамановской спектроскопии, реализуемый с помощью экспериментального стенда, включающий в себя рамановский пробник RPB-785 (фокусное расстояние 7,5 мм), совмещенный с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (мощность до 500 мВт, длина волны $784,7 \pm 0,05$ нм) и высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i, обеспечивающий спектральное разрешение 0,15 нм, со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-ОЕ (спектральный диапазон 200–1200 нм).

В данной области были сняты 72 спектра (с последующим усреднением) в различных точках костной ткани в норме и при пародонтите.

В результате исследований проведен хемометрический анализ спектров комбинационного рассеяния костной ткани в норме и при пародонтите. Были выявлены спектральные изменения в костной ткани при пародонтите, которые проявляются в изменении относительной интенсивности линий КР 850 см^{-1} (Proline benzene ring), 956 см^{-1} ($\nu_1\text{P-O symmetric stretch (PO}_4^{3-})$), 1069 см^{-1} (C–O inplane stretch ($\text{CO}_3 \nu_1$)), 1172 см^{-1} (Tyrosine, phenylalanine, C–H bend (protein)), $1242\text{--}1270\text{ см}^{-1}$ (Amide III), 1315 см^{-1} (Amide III (α helix)), $1385\text{--}1441\text{ см}^{-1}$ (CH_2 scissor inplane CH_3 bending fluctuations of lipids and proteins), 1555 см^{-1} (AmidIII—N–H), 1665 см^{-1} (Amide I), 1745 см^{-1} (phospholipids).

Выявлено, что при пародонтите в костной ткани происходят спектральные сдвиги, схожие с изменениями в органическом матриксе, возникающие при остеопорозе, которые обусловлены разрывом поперечных связей в органическом матриксе, что в свою очередь также влечет изменения и в минеральном составе костной ткани при пародонтите.

Таким образом, метод спектроскопии комбинационного рассеяния может быть использован для оценки костной ткани при пародонтите. Полученные результаты можно будет использовать для коррекции лечения данного заболевания.

Список литературы

1. Л. Ю. Орехова, Заболевания пародонта / Поли Медиа Пресс, 432 с, 2004.
2. Клинические особенности и структура микробиоты тканей пародонта у лиц молодого возраста / А.К. Абдрахманов, дис. Мамаева Е.В. доктор мед. Наук, проф.: 14.01.14. Казанский государственный медицинский университет, Казань, 197 с, 2019.
3. Клиника, диагностика и лечение зубов с внутренней резорбцией корня / Ю.Г. Лоос, дис. Макеева И.М. доктор мед. Наук, проф.: 14.01.14. – Первый Московский Государственный Медицинский Университет имени И.М. Сеченова, Москва, 189 с, 2020.
4. Е.Н. Егорова и др., Биохимия полости рта, учебное пособие для Б 638 студентов стомат. фак. / Тверь: Твер. гос. мед. универ., 155 с, 2018.
5. Н. А. Дорофейчик-Дрыгина, Л. Б. Дрыгина, Снижение минеральной плотности костной ткани и состояние зубочелюстной системы: клинические параллели // Medical alphabet. 2(31):50-53, 2018.
6. А. И. Булгакова, А. Ш. Галикеева, И. В. Валеев, Ф. Р. Хисматуллина, Э. Р. Изгина, Л. М.Хазиева, Г. В. Мамедова, К. С. Сафиуллина, Обследование стоматологического больного. Основные и дополнительные методы: уч. пособие // Уфа: Изд-во ГБОУ ВПО БГМУ Минздравсоцразвития России, 87 с, 2012.
7. А. В. Легких, Ю. В. Мандра, Д. В. Киселева, Метод рамановской спектроскопии как средство оценки морфологии микрорельефа поверхности зуба, а также степени минерализации твердых тканей зубов // ВЕСТНИК УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО МЕДИЦИНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА, 2–3 (29–30), 2015.
8. E. V. Timchenko, P. E. Timchenko, O. O. Frolov, E. F. Yagofarova, K. B. Chernyy-Tkach, M. A. Zybin, G G. Dolgushov, Optical Methods for Periodontitis Early Rapid Diagnosis // Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), IEEE 2019, 978-1-7281-4439-9/19 – C.298-300 DOI: 10.1109/EExPolytech.2019.8906802
9. Alex C.-T. Ko, Lin-P'ing Choo-Smith, Mark Hewko, and Michael G., Sowa, Detection of early dental caries using polarized Raman spectroscopy // Institute for Biodiagnostics, National Research Council Canada, OPTICS EXPRESS Vol. 14, No. 1, 13 p., 2006.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ МУТНОЙ СРЕДЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СЛАБОРАСХОДЯЩИМСЯ ГАУССОВЫМ ПУЧКОМ

Н. Г. Кашпур^{1*}, Н. В. Коваленко², О. А. Рябушкин²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701,
Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

*E-mail: kashpur.n@phystech.edu

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
141120, Российская Федерация, г. Фрязино, пл. Введенского, д. 1

В данной работе приводится аналитическое решение задачи о распространении излучения в полубесконечной мутной среде, на которую перпендикулярно падает слаборасходящийся гауссов пучок. Также проводятся соответствующие экспериментальные измерения на примере коровьего молока, подтверждающие полученное решение.

В последние годы в медицине все больше применяются оптические методы лечения и диагностики заболеваний [1]. Для получения контролируемого результата необходимо иметь точное представление о взаимодействии излучения с биологической средой, а также математические модели, количественно описывающие распространение оптического излучения. Также в последнее время активно развиваются методы проведения хирургических операций с контролем состояния тканей в реальном времени [2], ставящие высокие требования к скорости моделирования.

На данный момент известно несколько подходов к решению задачи распространения света в биологической среде. Одним из основных подходов является эвристическая теория переноса излучения, в которой излучение описывается уравнением в стационарной форме, имеющим вид:

$$\vec{s}\nabla L(\vec{r}, \vec{s}) = -\mu_t L(\vec{r}, \vec{s}) + \mu_s \int_{4\pi} p(\vec{s}, \vec{s}') L(\vec{r}, \vec{s}') d\omega' + S(\vec{r}, \vec{s}), \quad (1)$$

где $L(\vec{r}, \vec{s})$ – энергетическая яркость излучения в ткани, $\mu_s, \mu_a, \mu_t = \mu_a + \mu_s$ – коэффициенты рассеяния, поглощения и экстинкции, соответственно, $p(\vec{s}, \vec{s}')$ – фазовая функция рассеяния, \vec{s} – единичный вектор вдоль направления распространения света, $S(\vec{r}, \vec{s})$ – функция источников излучения. Однако аналитическое решение уравнения (1) может быть получено в ограниченном количестве частных случаев, а его прямое численное моделирование требует больших вычислительных ресурсов и не может быть произведено в реальном времени ввиду необходимости использовать 5-мерную сетку (по координате и углу распространения) при вычислении.

Диффузно приближение позволяет существенно упростить исходное уравнение и, таким образом расширяет возможности получения аналитического решения. Сутью данного приближения является предположение о малом числе событий поглощения относительно событий рассеяния. Пользуясь данным предположением, можно получить уравнение транспорта в виде [3]:

$$D\Delta\Phi(\vec{r}) - \mu_a\Phi(\vec{r}) = -S(\vec{r}), \quad (2)$$

где $\Phi(\vec{r})$ – интенсивность изотропной компоненты, $D = \frac{1}{\mu_a + (1-g)\mu_s}$ – оптический коэффициент диффузии, g – средний косинус угла рассеяния.

Важной и часто встречающейся задачей является задача нормального падения гауссова пучка, при которой функция источников $S(\vec{r})$ в уравнении (2) принимает вид $S(\vec{r}) = \mu_s A \cdot \exp\left(-\mu_t z - \frac{r^2}{2\omega_0^2}\right)$, где z – глубина по отношению к границе среды, r – расстояние до оси падения пучка, ω_0 – радиус перетяжки пучка. Например, такая постановка встречается при применении лазера в лапароскопической резекции почки [4].

В данной работе показано аналитическое решение поставленной задачи для полубесконечной среды с границей раздела в $z = 0$, которое было получено с применением Фурье разложения по мнимым экспонентам.

Полученное решение имеет следующий вид:

$$\Phi(r, z) = e^{-\mu_t z} \cdot \int_0^\infty \left(1 - \frac{\left(2\mu_t D \frac{R_{эфф}+1}{R_{эфф}-1} + 1 \right) \cdot e^{\left(\mu_t - \sqrt{t^2 + \frac{\mu_a}{D}} \right) z}}{2D \frac{R_{эфф}+1}{R_{эфф}-1} \cdot \sqrt{t^2 + \frac{\mu_a}{D}} + 1} \right) \cdot \frac{\mu_s A w_0^2}{4\pi D} \cdot \frac{e^{-\frac{(w_0 t)^2}{2}}}{\mu_t^2 - \frac{\mu_a}{D} - t^2} J_0(tr) \cdot t dt \quad (3)$$

где $R_{эфф}$ – эффективный показатель преломления.

Также в работе были произведены экспериментальные измерения, подтверждающие данную зависимость. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Коллимированное гауссово излучение от источника (ИИ) с длиной волны 1064 нм перпендикулярно падает на образец (ОБР), в качестве которого было использовано коровье молоко. Рассеянное в среде излучение улавливалось зондирующим волокном (В), расположенным так, чтобы его торец касался образца, и регистрировалось фотодетектором (ФД), подключенным к вольтметру (ВМ). Положение зондирующего волокна регулировалось с помощью трехосевой подвижки (ЗхП), управляемой персональным компьютером (ПК). В процессе эксперимента регистрировалась зависимость сигнала фотодетектора в зависимости от расстояния между центрами падающего на образец гауссова пучка и зондирующего волокна. На рис. 2 приведена полученная зависимость в полулогарифмическом масштабе, а также ее аппроксимация на основе формулы (3), при значениях оптических свойств $\mu_a = 74,1 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$, $\mu_s = 53,7 \text{ мм}^{-1}$ и $g = 0,95$. Полученные свойства соответствуют приведенным в литературе данным [5].

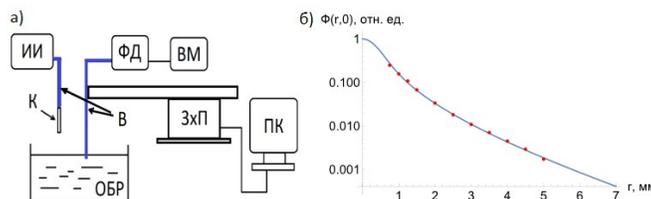


Рис. 1. а) Схема экспериментальной установки. ИИ – источник излучения, К – коллиматор, ОБР – образец, ФД – фотодетектор, В – оптическое волокно, ВМ – вольтметр, ЗхП – трехосевая подвижка, ПК – персональный компьютер. б) Зависимость изотропной компоненты энергетической яркости от r в плоскости $z = 0$

Полученная в работе формула показала высокое соответствие с экспериментом. На ее основе могут быть реализованы методы контроля оптических свойств во время проведения хирургических операций в режиме реального времени.

Данная работа была проведена в рамках государственного задания.

Список литературы

1. Laser-tissue interactions: fundamentals and applications / M. H. Niemz: Springer, Berlin, 2004.
2. V. K. Nagarajan, et.al. Real time evaluation of tissue optical properties during thermal ablation of ex vivo liver tissues // International Journal of Hyperthermia, vol. 35 (1), pp. 176-182, 2018.
3. Optical-thermal response of laser-irradiated tissue / A. J. Welch and M. J. Gemert.: Springer, Dordrecht, pp. 155-157, 2011.
4. V. Arkhipova, M. Enikeev, E. Laukhtina, A. Kurkov, V. Andreeva, I. Yaroslavsky and G. Altschuler Ex Vivo and Animal Study of the Blue Diode Laser, Tm Fiber Laser, and Their Combination for Laparoscopic Partial Nephrectomy // Lasers in Surgery and Medicine, 2020.
5. B. Aernouts, R. Van Beers, R. Watté, T. Huybrechts, J. Lammertyn and W. Saeys Visible and near-infrared bulk optical properties of raw milk // Journal of Dairy Science, 2015.

РАДИОЧАСТОТНО-ОПТИЧЕСКИЙ ЗОНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗНООБРАЗНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Н. В. Коваленко^{1*}, О.А. Рябушкин¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
141120, Российская Федерация, Фрязино, пл. Введенского, д. 1

*E-mail: nikomsol94@gmail.com

В работе представлен новый тип зонда, совмещающий в себе возможности одновременных спектральных исследований в оптическом и радиочастотном (РЧ) диапазонах электромагнитного излучения. Проведено исследования РЧ чувствительности зонда к поверхности различных материалов, а также измерены кинетики РЧ отклика поверхности картофеля на оптическое воздействие.

Лазерное излучение активно применяется для воздействия на биологические ткани, как в медицинских, так и в исследовательских приложениях.

Существует множество способов изучения процессов, происходящих под действием оптического облучения: гистологический анализ, применяемый для исследования необратимого теплового воздействия на биоткани [1]; регистрация изменения оптических свойств, таких как коэффициенты отражения и пропускания [2]; измерение электрических свойств в радиочастотном (РЧ) спектральном диапазоне и пр.

Гораздо большую информацию о протекающих в объекте исследования процессах может дать совместное использование различных методик, например, в работе [3] электрические и оптические свойства измеряются совместно, для контроля состояния ткани в процессе РЧ абляции. Также существенными при исследованиях являются свойства неинвазивности и бесконтактности проводимых исследований, позволяющие снизить влияние измерений на протекающие процессы.

В данной работе мы предлагаем новый тип зонда, для одновременного бесконтактного исследования оптического и РЧ отклика поверхностей различных материалов на внешние воздействия. Работоспособность зонда была проверена при регистрации РЧ отклика поверхности плода картофеля на воздействие лазерным облучением.

Зонд основан на использовании радиочастотно-оптического коаксиального кабеля (РОКК), состоящего из специального оптического волокна с металлическим покрытием, а также внешнего экранирующего металлического капилляра, изолированного от металлического покрытия волокна слоем диэлектрика (рис. 1а). Зонд состоит из двух РОКК, расположенных в одной вертикальной плоскости. Блок-схема установки представлена на рис. 1б. На один из РОКК (источник РЧ поля) с помощью генератора подается гармоническое напряжение U_g на частоте f , ко второму РОКК (приемная антенна РЧ сигнала) подключено нагрузочное сопротивление R_l , напряжение с которого U регистрируется с помощью синхронного детектора. Таким образом происходит измерение сигнала пропорционального емкости C_z , образованной концами РОКК:

$$U = 2\pi if \times R_l C_z \times U_g$$

На рис. 2а представлены графики зависимости измеренной емкости от расстояния между плоскостью образца и зондом для кварцевого стекла, меди, картофеля и дистиллированной воды. Видно существенно различие полученных зависимостей для различных материалов образца.

Для демонстрации экспериментальных возможностей новой методики были проведены измерения РЧ отклика поверхности картофеля на оптическое воздействие. Через оптическое волокно одного из РОКК к поверхности образца доставлялось излучение на длине волны 1550 нм с мощностью 1 Вт в течении 10 секунд. Отклик зонда в таком эксперименте представлен на рис. 2б. Основным фактором, приводящим к измене-

нию емкости зонда, является испарение жидкости, что подтверждается представленными измерениями при наличие воздушного обдува облученной области, проводящего к значительному уменьшению отклик зонда.

Таким образом предложенный радиочастотно-оптический зонд позволяет проводить измерения РЧ отклика биологических объектов на оптическое воздействия. Помимо этого, конструкция зонда может быть использована для одновременного исследования и оптического отражения. Предлагаемая новая методика исследований поверхностей разнообразных материалов будет развиваться не только в научных, но в прикладных направлениях.

Данная работа была проведена в рамках государственного задания.

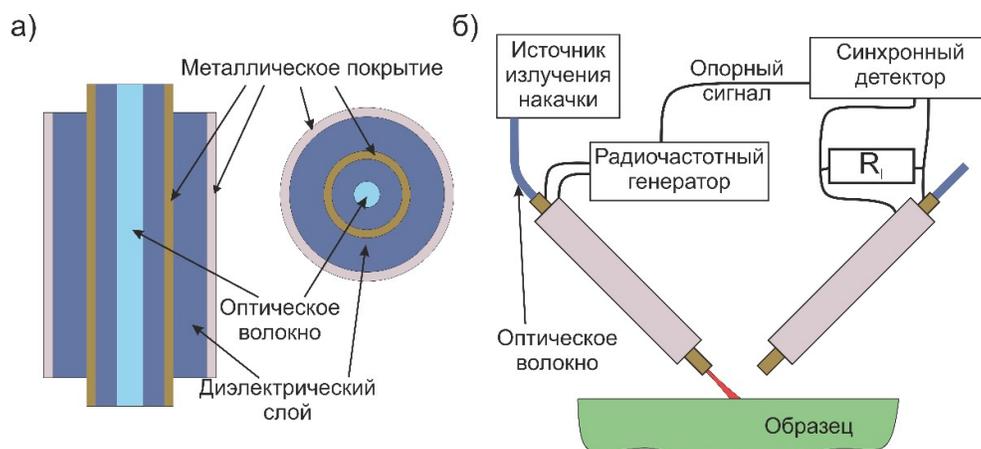


Рис. 1. а) Схема радиочастотно-оптического коаксиального кабеля
б) Блок-схема экспериментальной установки

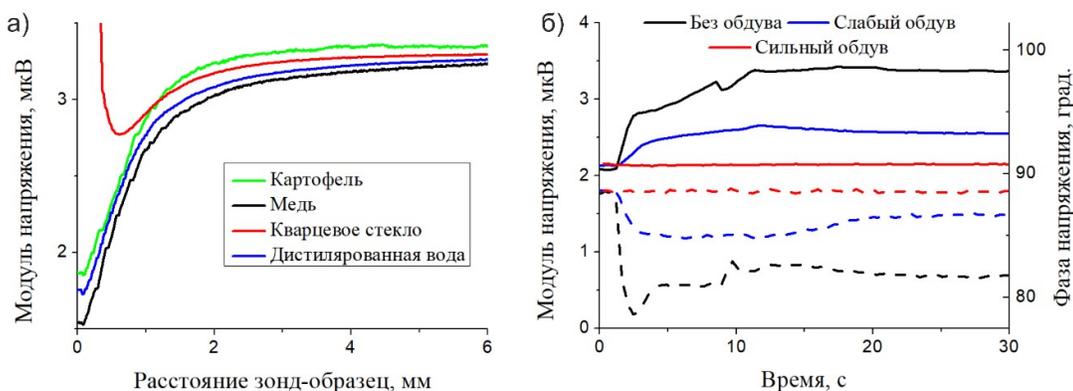


Рис. 2. Зависимость измеряемого напряжения а) от расстояние зонд-образец для разных типов образцов
б) от времени при облучении образца картофеля в течении 10 секунд при разных режимах обдува (сплошные линии – модуль напряжения, пунктирные линии – фаза)

Список литературы

1. V. Arkhipova, et.al. Ex vivo and animal study of the blue diode laser, Tm fiber laser, and their combination for laparoscopic partial nephrectomy //Lasers in Surgery and Medicine, vol. 52 (5), pp. 437-448, 2020.
2. V. K. Nagarajan, et.al. Real time evaluation of tissue optical properties during thermal ablation of ex vivo liver tissues //International Journal of Hyperthermia, vol. 35 (1), pp. 176-182, 2018.
3. P. Lanka, et.al. Optical signatures of radiofrequency ablation in biological tissues //Scientific reports, vol. 11 (1), pp. 1-14, 2021.

МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ СЕНСОР НА ТЕМПЕРАТУРУ

Д. А. Лях*, Д. П. Суржикова, Е. А. Слюсарева

¹Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 28
*E-mail: laxi2405@mail.ru

Флуоресцентными методами было исследовано влияние температуры на дианион-анионное равновесие флуоресцеина. Измерены спектры испускания в диапазоне температур 10-80 °С, получена и проанализирована зависимость ратиометрического сигнала от температуры при различных значениях рН. Результаты обсуждены в терминах установления равновесия в основном и возбужденном состоянии. Выявлена линейная корреляция между температурой и ратиометрическим флуоресцентным сигналом флуоресцеина при рН вблизи ионного равновесия. Данная зависимость может быть использована для создания реверсивного флуоресцентного сенсора на температуру в объектах, где использование других видов датчиков затруднено.

В науке и технике используются разнообразные методы измерения температуры. Люминесцентные молекулярные датчики температуры основаны на изменении спектрального и/или амплитудного сигнала люминесценции. Они обладают рядом несомненных преимуществ: бесконтактны, имеют быстрый отклик и специфическую локализацию, однако могут уступать по таким параметрам как чувствительность и реверсивность.

В настоящей работе мы впервые исследовали температурную чувствительность и реверсивность флуоресцентного сигнала флуоресцеина при физиологическом значении рН. Выбор красителя обусловлен тем, что в широком диапазоне рН он существует в виде равновесной смеси нескольких ионных форм, каждая из которых имеет собственные спектральные характеристики [1–3]. Практически важный для изучения физиологических процессов диапазон рН 5÷8 характеризуется дианион-анионной степенью диссоциации (рК 6,3) [1]. Флуоресцентный сигнал флуоресцеина зависит от ряда факторов. Это соотношение ионных форм, которое регулируется рН, длина волны возбуждения, а также эффективность установления ионного равновесия в основном и возбужденном состоянии. Последний фактор определяется термодинамикой процессов и определяется температурой.

В работе были измерены спектры флуоресценции на двух длинах волн возбуждения – 488 и 435 нм, соответствующих преимущественному поглощению дианиона и аниона флуоресцеина в диапазоне температур 10-80 °С. В качестве аналитического сигнала, не зависящего от концентрации красителя и геометрии возбуждения, использовалось отношение сигналов флуоресценции, полученных в максимуме спектра (520 нм) при двух длинах волн возбуждения (рис.1).

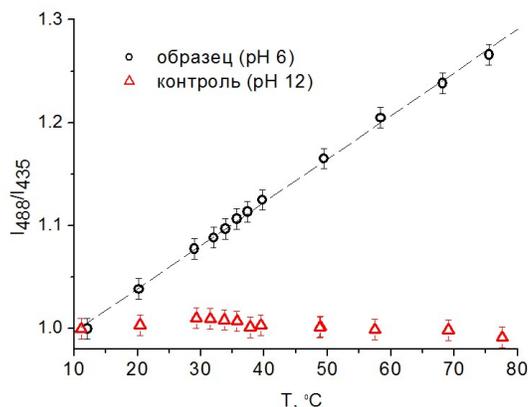


Рис. 1. Зависимость ратиометрического сигнала от температуры

Была выявлена линейная корреляция между температурой и флуоресцентным сигналом флуоресцеина вблизи значения pK (при pH 6,0). Линейная зависимость имеет постоянные характеристики как в цикле нагревания, так и в цикле охлаждения. Точность определения температуры с помощью градуировочной кривой составляет $2^{\circ}C$ и может быть повышена в несколько раз путем выбора оптимальных длин волн возбуждения. Результаты обсуждены в терминах установления ионного равновесия в основном и возбужденном состоянии в рамках формализма Вант-Гоффа [4] и термодинамического цикла Ферстера [5].

Установленная чувствительность аналитического сигнала и его реверсивность позволяют использовать флуоресцеин в качестве молекулярного флуоресцентного сенсора на температуру.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSRZ-2020-0008)

Список литературы

1. N. Klonis, W.H. Sawyer Properties of the Prototropic Forms of Fluorescein in Aqueous Solution // *Journal of Fluorescence*, vol. 6 (3), pp. 147–157, 1996.
2. D. Surzhikova, M. Gerasimova, V. Tretyakova, et.al. Emission properties of fluorescein in strongly acidic solutions // *J. Photochem. Photobiol. A.*, vol. 413, pp. 113233, 2021.
3. Д.П. Суржикова, М.А. Герасимова, Е.А. Слюсарева Протолитическое равновесие возбужденных состояний флуоресцеин // *Известия ВУЗов. Физика*, т. 64 (11), с. 108–114, 2021.
4. P.W. Atkins, J. De Paula, J. Keeler, *Atkins' physical chemistry* // Oxford: Oxford University Press, 2018.
5. B. Valeur, M.N. Berberan-Santos *Molecular fluorescence: principles and applications*. // Weinheim: Wiley-VCH, 2012.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФОТОПРОТЕИНОВ С АМИНОКИСЛОТНЫМИ ЗАМЕНАМИ В АКТИВНЫХ ЦЕНТРАХ ОБЕЛИНА И АКВОРИНА

А. В. Рогова^{1*}, Ф. Н. Томилин^{1,2}, Н. П. Маликова³, Е. С. Высоцкий³

¹Сибирский федеральный университет
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79

*E-mail: arogova1927@gmail.ru

²Институт физики им. Киренского,
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,
660036, Россия, Красноярск, Академгородок 50/38

³Институт биофизики
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,
660036, Россия, Красноярск, Академгородок 50/50

Ca²⁺-регулируемые фотопротеины обнаружены в различных биолюминесцентных морских организмах, в основном кишечнополостных, и отвечая за их световое излучение. Наиболее известным из них является акворин из *Aequorea* и обелин гидроидного полипа *Obelia longissima*. Данные белки являются высокочувствительными репортёрами для анализа *in vitro* благодаря высокому квантовому выходу его биолюминесцентной реакции и низкому уровню шума. Особое внимание уделяется современным методам иммобилизации ферментов и их применение для медицинской диагностики, мониторинга окружающей среды, фармацевтической и пищевой промышленности. Единичные замены определенных аминокислотных остатков в активном центре фотопротеинов приводят к изменениям спектров биолюминесценции и кинетики биолюминесцентной реакции. Однако получить кристаллическую структуру мутантов с заменёнными аминокислотами трудоёмкий и сложный процесс. Таким образом, неизвестна структура мутантных белков, непонятен механизм биолюминесцентной реакции и причина уменьшения скорости и активности фотопротеинов. Получить недоступную для эксперимента информацию о механизме биолюминесценции в мутантах, а именно, о структуре мутантов, конформационном изменении субстрата в окружении аминокислот, позволяют современные квантовохимические методы расчётов.

Обелин вместе с акворинном и другими фотопротеинами, происходящими в основном от морских биолюминесцентных кишечнополостных, обитающих в холодных морях, представляют собой подсемейство Ca²⁺-связывающих фотопротеинов, которые проявляют биолюминесценцию, интенсивность которой тесно зависит от количества белка и присутствия катионов кальция. [1]. В последнее время с развитием знаний о пространственной структуре некоторых фотопротеинов появилась возможность понять, как сама структура белка и, в частности, ключевые остатки в активном сайте определяют различные свойства фотопротеинов. Возникает возможность, что на основе структурной информации можно планировать рациональные мутации для инженерии свойств фотопротеина, модуляции цвета биолюминесценции, кинетики вспышки и т. д., чтобы применить их в аналитических методологиях. А именно, в разработке биосенсоров: биологических и молекулярных системах распознавания, преобразователей для биосенсоров и технологии биомассивов, миниатюрные и микроинженерные системы [2].

Значительный интерес с теоретической и практической точки зрения вызывают результаты спектральных и кинетических свойств мутантов фотопротеинов с аминокислотными заменами в активном центре белка. Дело в том, что единичные замены определенных аминокислотных остатков в фотопротеинах приводят к изменениям спектров биолюминесценции и кинетики биолюминесцентной реакции. Существуют предположения относительно функций некоторых аминокислотных остатков биолюминесценции белков. Однако для более глубокого изучения данного вопроса необходимо исследовать пространственную структуру и свойства различных мутантных фотопротеинов.

В данной работе, при замене His22 на Thr в обелине биолюминесцентная активность стала на три порядка меньше, а в акворине на два порядка меньше. Образование активного фотопротеинового комплекса, т. е. фактически 2-гидропероксицелентеразина в активном центре, происходит существенно медленнее, кроме того, в случае акворина более выражено. При замене His22 на Asn и в обелине и в акворине также происходит

падение удельной активности, но в меньшей степени, чем при замене на Thr. Скорость образования активного фотопротейна в случае обоих белков, также значительно меньше, чем для белков дикого типа. Спектр биолюминесценции у всех мутантов смещён в более коротковолновую область: максимум излучения для обелина с заменой (H22N) составляет 395 нм, (H22T) – 393 нм, тогда как у дикого обелина (без замены His22) – 480 нм с небольшим плечом около 390 нм. Для аквориновых мутантов аналогичная картина: максимум биолюминесценции акворина с заменой (H16N) составляет 393 нм, (H16T) – 388 нм, дикий акворин (без замены His16) – 470 нм. Спектры флуоресценции Ca^{2+} -разряженных мутантов (после биолюминесцентной реакции) также смещены в коротковолновую область спектра.

Влияние аминокислотного окружения целентеразин-связывающей полости обелина на анион целентеразина (CTZ^-) было исследовано с помощью квантовохимических фрагментов (FMO) [3], а анализ парных взаимодействий между аминокислотными остатками биолюминесцентной реакции был проведен с помощью метода PIEDA. Была проведена предварительная оптимизация структур обелина без замены и с заменой аминокислоты His22 на Trh, Asn, Asp, с использованием метода FMO в программе GAMESS [4]. Рассчитаны спектры поглощения аниона CTZ^- в обелине при помощи процедуры TD. В том, числе и для акворина была проведена оптимизация структур с заменой и без замены аминокислот His16 на Trh, Asn, Asp с использованием метода квантово-химических фрагментов, проведен PIEDA анализ. При помощи PIEDA анализа получены дисперсионные взаимодействия, полная энергия взаимодействия и отталкивающие взаимодействия. Исследование влияния ближайшего аминокислотного окружения на энергетические свойства CTZ^- с помощью методов FMO выявило различную степень взаимодействия для отдельных аминокислотных остатков. Получена энергия связывания отдельных аминокислот и субстрата. При сравнении оптимизированных структур диких обелина и акворина и в том числе их конформаций при замене аминокислот, получено, что активный центр обелина подвержен наибольшим деформациям.

Таким образом, в работе были получены данные, характеризующие особенности взаимодействия между заменёнными аминокислотами и анионом целентеразина. Проведенное исследование вносит вклад в дальнейшее понимание механизма образования активного фотопротейнового комплекса. На основе этих данных может быть сконструирован ряд мутантов обелина и акворина, обладающих уникальными свойствами. Возникает возможность, что на основе структурной информации можно планировать рациональные мутации для инженерии свойств фотопротейна, модуляции цвета биолюминесценции и т. д., чтобы применить их в аналитических методологиях. А именно, в разработке биосенсоров: биологических и молекулярных системах распознавания, преобразователей для биосенсоров и технологии биомассивов, миниатюрные и микроинженерные системы

Список литературы

1. Liu Z.-J. et al. Structure of the Ca^{2+} -regulated photoprotein obelin at 1.7 Å resolution determined directly from its sulfur substructure // *Protein Science*. Cambridge University Press, vol. 9 (11), pp. 2085–2093, 2000.
2. Scott D. et al. Bioluminescence and its impact on bioanalysis // *Annual review of analytical chemistry*. Annual Reviews, vol. 4, pp. 297–319, 2011.
3. Fedorov D.G. The fragment molecular orbital method: theoretical development, implementation in GAMESS, and applications // *WIREs Computational Molecular Science*, vol. 7 (6), 1322 p., 2017.
4. Schmidt M.W. et al. General atomic and molecular electronic structure system // *Journal of computational chemistry*. Wiley Online Library, vol. 14 (11), pp. 1347–1363, 1993.

МЕТОД СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ КСЕНОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ

П.Е. Тимченко¹, Е. В. Тимченко¹, Е.В. Писарева¹, О. О. Фролов¹, М. Ю. Власов²,
Л. Т. Волова², Р.Т. Самигуллин^{1*}, А.А. Гнедова¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
443086, Российская Федерация, Самара, ул. Московское шоссе, д. 34

*E-mail: samigullin.ravil2015@yandex.ru

² Самарский государственный медицинский университет, биотехнологический центр «БиоТех»
443079, Российская Федерация, Самара, ул. Гагарина, д. 20

Аннотация. В данной статье представлены результаты спектральных исследований ксеноматериалов, полученных из разных источников и при разной степени деминерализации. Деминерализация исследуемых образцов проводилась с помощью соляной кислоты со степенью нормальности 1.8н, 2.4н. Все исследования проводились с помощью метода Рамановской спектроскопии. В результате проведенных исследований, был проведен расширенный анализ ксеноматериалов, в процессе их изготовления. С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния установлено, что деминерализации (при степени нормальности 2,4), в ксеноматериалах, изготовленных из моляров происходит быстрее, чем в резцах, что позволяет оптимизировать процесс изготовления ксеноматериалов.

Для выполнения стоматологических реставрационных процедур и восполнения дефицита костной ткани альвеолярного отростка как правило используются ауто- и аллогенные биосовместимые материалы. Однако часто, из-за отсутствия донорского материала либо нежелания пациента использовать аллогенные ткани, возникают сложности с подбором биоимплантатов. Поэтому ведется поиск альтернативных заменителей дентальных тканей. Изучена биологическая реакция крыс на костный трансплантат крупного рогатого скота при восстановлении альвеолярной кости [1]. Возможность использования деминерализованного матрикса зубов в качестве носителя факторов роста и стволовых клеток доказана в работах [2,3]. В связи с этим возникает необходимость разработки методик оценки качества ксеногенного костно-пластического материала с использованием удаленных зубов животных.

Целью работы являлась оценка деминерализации ксеноматериалов разного происхождения при их изготовлении с использованием метода спектроскопии комбинационного рассеяния.

Объектами исследования являлись группы образцов ксеноматериалов, изготовленных по технологии «Лиопласт»® из зубов коровы (ТУ-9398-001-01963143-2004). Образцы исследований были разделены на 2 основные группы по степени деминерализации: 1 группа – образцы с деминерализацией 1.8н, 2 группа – образцы с деминерализацией – 2.4н. В каждой группе, в качестве образцов для изготовления ксеноматериалов, были использованы моляры и резцы.

В качестве основного метода анализа ксеноматериалов был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния, реализуемый с помощью экспериментального стенда, включающий в себя рамановский пробник RPB-785 (фокусное расстояние 7,5 мм), совмещенный с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (мощность до 500 мВт, длина волны $784,7 \pm 0,05$ нм) и высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i, обеспечивающий спектральное разрешение 0,15 нм, со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE (спектральный диапазон 200-1200 нм). [4]. Спектры снимали в трех различных точках и усреднялись с помощью пакета программного обеспечения «Wolfram mathematica». Для полученных разделенных спектров КР был проведен линейный дискриминантный анализ в программной среде IBM SPSS Statistics.

В качестве дополнительного метода исследования был проведен биохимический анализ.

В результате проведенных исследований, был проведен расширенный анализ образцов ксеноматериалов, в процессе их деминерализации. Установлены спектральные изменения образцов ксеноматериалов при разной степени деминерализации. Показано,

что при степени нормальности 2,4 происходит полная деминерализация ксеноматериалов, полученных из моляров, о чем свидетельствует уменьшение интенсивности КР на линиях 956 см^{-1} (PO_4^{3-} , P–O симметричное валентное), 1071 см^{-1} (CO_3^{2-} , C–O плоское валентное).

Таким образом, с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния было установлено, что ксеноматериалы, полученные из моляров целесообразнее использовать в процессе изготовления для оптимизации процесса их производства.

Результаты подтверждены биохимическим анализом.

Список литературы

1. C.S. de Almeida, S.C. Sartoretto, I.M. Durte, A.T.N.N Alves, H.V. Barreto, R.F.B Resende, et.al. In vivo evaluation of bovine xenograft associated with oxygen therapy in alveolar bone repair // J. Oral. Implantol. vol. 47(6), pp. 465-471. 2021.

2. G. Liu, G. Xu, Z. Gao, Z. Liu, J. Xu, J. Wang, et.al. Demineralized dentin matrix induces odontoblastic differentiation of dental pulp stem cells // Cells Tissues Organs. vol. 201(1), pp. 65-76, 2016.

3. М.З. Федорова, С.В. Надеждин, Н.А. Павлов, Е.В. Зубарева Исследование остеоиндуктивных и остеокондуктивных свойств костнопластических материалов на основе гидроксиапатита и коллагена // Нанотехнологии и охрана здоровья. №1, сс.42-46, 2010.

4. P. E. Timchenko, E. V. Timchenko, L. T. Volova, M. A. Zybin, O. O. Frolov, G. G. Dolgushov Optical assessment of dentin materials // Optical Memory and Neural Networks. vol. 29(4), pp. 354–357, 2020.

МОНИТОРИНГ ВЫВЕДЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ИЗ ОРГАНИЗМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

О. Э. Сарманова^{1,2*}, А. Д. Кудряшов¹, К. А. Лаптинский², С. А. Буриков¹, М. Ю. Хмелева¹,
А. А. Федянина¹, С. А. Доленко², П. В. Голубцов¹, Т. А. Доленко¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Физический факультет
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1с2

*E-mail: oe.sarmanova@physics.msu.ru

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Физический факультет,
НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1с2

В работе предлагается методика мониторинга выведения из организма компонентов наноконструкта на основе углеродных точек (УТ) и противоракового препарата доксорубицина (Докс). Контроль концентрации УТ и Докс в моче предлагается осуществлять с помощью флуоресцентной спектроскопии и нейронных сетей. В работе задача была решена тремя способами с использованием трех наборов данных флуоресцентной спектроскопии: спектральных данных, полученных путем возбуждения флуоресценции (ФЛ) водных суспензий УТ и Докс в моче излучением с длиной волны 405 нм, 532 нм, а также спектров, полученных путем объединения этих данных. К полученным данным были применены многослойные перцептроны (МСП). Для повышения точности мониторинга выведения УТ и Докс с мочой дополнительно использовались анализ главных компонент и автоэнкодеры.

Применение любого лекарственного препарата связано с необходимостью контроля его выведения из организма в течение определенного временного интервала. Это утверждение в полной мере относится к препаратам на основе нанотехнологий, которые в последние десятилетия активно внедряются в медицинскую практику. Так, на момент 2019 года в мире было одобрено более 25 препаратов на основе нанотехнологий и еще около 90 наноагентов проходили клинические исследования [1].

В данном исследовании представлен подход к решению проблемы контроля выведения наноагентов из организма посредством мочеполовой системы с помощью углеродных точек (УТ) с использованием флуоресцентной спектроскопии и нейронных сетей (НС). Использование НС обусловлено значительной вариабельностью флуоресцентных свойств мочи (рис. 1) – форма спектра зависит от многих трудно контролируемых факторов (возраст, пол, питание, состояния здоровья, времени взятия пробы и т. д.). Именно поэтому стандартные методы обработки спектроскопических данных неприменимы к этой проблеме.

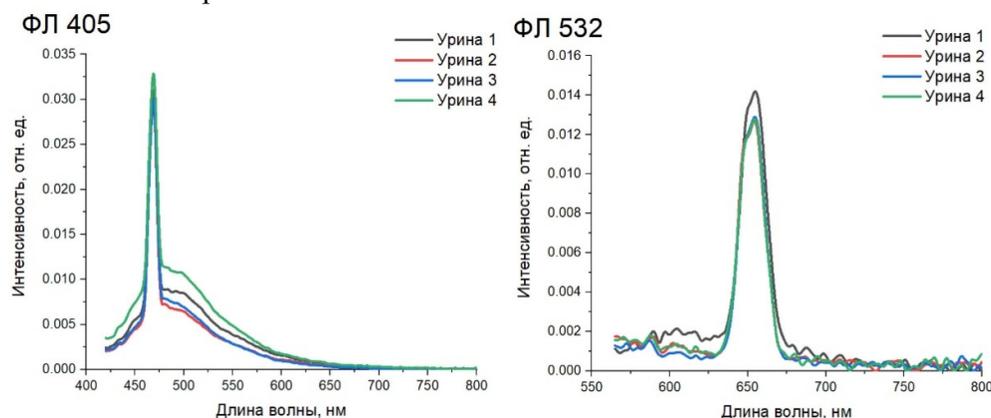


Рис. 1. Спектры флуоресценции мочи при возбуждении излучением с длинами волн 405 нм (слева) и 532 нм (справа).

В ходе работы было приготовлено 624 суспензии наноконплексов УТ с адсорбированным на них противораковым препаратом – доксорубицином (Докс) – в моче. Концентрации УТ и Докс варьировались от 0 до 1.2 мг/л с шагом 0.05 мг/л и от 0 до 1 мг/л с шагом 0.042 мг/л, соответственно. Задача была решена с использованием трех наборов данных оптической спектроскопии: спектров ФЛ водных суспензий УТ и Докс в моче при возбуждении излучением с длинами волн 405 нм, 532 нм (рис. 2), а также спектров, представляющих комбинацию двух предыдущих. К полученным спектральным данным были применены полностью связанные нейронные сети – многослойные перцептроны (МСП). Для повышения точности мониторинга выведения УТ и Докс с мочой дополнительно использовались два алгоритма уменьшения размерности исходных данных – анализ главных компонент (АГК) и автоэнкодеры.

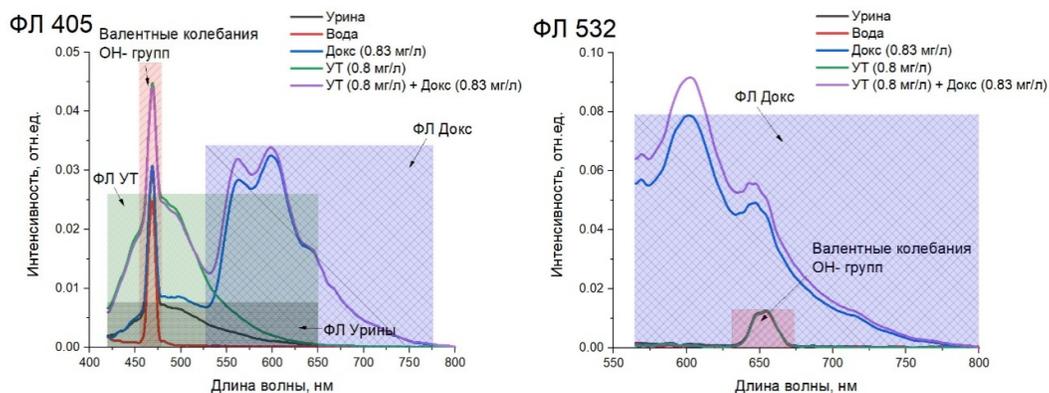


Рис. 2. Спектры флуоресценции дистиллированной воды, урины и суспензий УТ, Докс и УТ+Докс в моче при возбуждении излучением с длинами волн 405 нм (слева) и 532 нм (справа).

В работе показано, что лучшие результаты решения обратной задачи достигаются при применении МСП к спектральным данным, сжатым с помощью автоэнкодеров. Данный подход позволяет определять концентрацию УТ и Докс в моче со средней абсолютной ошибкой 39 нг/мл и 27 нг/мл, соответственно. АГК, линейный по своей природе, не позволил снизить ошибку определения концентраций компонентов суспензий.

Отметим, что ошибка определения концентраций компонентов суспензии, полученная нами с использованием разработанного подхода, сопоставима с результатами альтернативных методик, например, основанных на эффекте внутреннего фильтра [2]. Однако рассматриваемые в [2] системы требуют жесткой фиксации концентрации УТ в суспензии, что невозможно для реальной биомедицинской задачи контроля выведения компонентов наноконпозита из организма. Использование методов машинного обучения в нашем исследовании, включая «подход от эксперимента» при использовании НС, позволяет учитывать изменения концентрации многих компонентов в суспензии. Таким образом, этот метод может быть использован для одновременного мониторинга целого ряда веществ, в то время как большинство датчиков на основе УТ калибруются для измерения одного или двух параметров.

Вклад О.Е. Сармановой (программирование и обучение НС) был поддержан Фондом содействия развитию теоретической физики и математики «БАЗИС» (Проект № 19-2-6-6-1). Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-11-00333, <https://rscf.ru/project/19-11-00333/> (все остальные работы).

Список литературы

1. A.C. Anselmo, S. Mitragotri. Nanoparticles in the clinic: An update // *Bioengineering & translational medicine*, vol. 4, pp. e10143-1– e10143-16, 2019.
2. M. Yang, Y. Yan, E. Liu, et. al. Polyethyleneimine-functionalized carbon dots as a fluorescent probe for doxorubicin hydro-chloride by an inner filter effect // *Opti. Mater.*, vol. 11, pp. 110743-1 – 110743-6, 2021.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ФЁРСТЕРА В СИСТЕМАХ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ СООТНОШЕНИЕМ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ

Н. В. Слюсаренко*, Д. П. Суржикова, Д. О. Кузнецова, Е. А. Слюсарева

*Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
E-mail: sci_box@mail.ru

Классическая Фёрстеровская теория подразумевает рассмотрение переноса энергии от одного донора к одному акцептору. Однако в реальных системах возможно отклонение от теории в результате сложной стехиометрии флуорофоров. В работе выполнено численное моделирование переноса энергии для случая множества доноров и акцепторов на основе метода Монте-Карло и теории Фёрстера в среде Matlab. Метод Монте-Карло позволяет моделировать случаи случайного распределения флуорофоров, теория Фёрстера была использована для расчета параметров переноса энергии. Результаты расчета были сопоставлены с экспериментально-детектируемым переносом энергии. В эксперименте были использованы полимерные пленки, допированные полупроводниковыми квантовыми точками и молекулами органического красителя. Было показано, что результаты численного моделирования адекватно описывают экспериментальные данные, что может быть использовано для расчета параметров переноса энергии для аналогичных систем.

Фёрстеровский перенос энергии (ФПЭ) [1] – это явление переноса энергии без промежуточного испускания фотона в результате диполь-дипольного взаимодействия. Благодаря сильной зависимости переноса энергии от расстояния между флуорофорами $\sim 1/r^6$ данный механизм может быть использован в биологии и медицине, например, для исследования размеров биологических систем и создания оптических зондов [2]. Данный механизм подходит для применений в областях, где необходимо перестраивать длину волны испускания, например, для оптоэлектронных устройств, солнечных ячеек, диодов, дисплеев, лазеров, фотокатализа, а также для применения в фотолитографии [3].

Однако, существует ряд проблем применения «классического» фёрстеровского переноса энергии [4]. Перенос энергии происходит на расстояниях порядка 10 нм, а результаты интерпретируются в большинстве случаев с использованием классической модели, которая рассматривает перенос энергии от одного донора к одному акцептору. Во многих случаях необходимо применение других подходов для анализа полученных результатов. Например, для случая неупорядоченного расположения флуорофоров, где существует возможность отклонения от классической теории в результате сложной стехиометрии. Поэтому разработка методов и подходов, которые выходят за пределы «классического» механизма переноса энергии, позволит расширить диапазон действия и возможность управления данным механизмом, а также адекватно интерпретировать экспериментальные данные.

В работе реализовано численное моделирование в среде Matlab фёрстеровского переноса энергии на основании подхода из работы [5], в которой предложено использовать численный метод Монте-Карло для моделирования случайного расположения флуорофоров и теория Фёрстера [1]. На основании этого подхода было реализовано численное моделирование переноса энергии в зависимости от расстояния между флуорофорами, соотношения доноров и акцепторов, а также таких параметров как фёрстеровский радиус, время жизни донора, молярный коэффициент экстинкции акцептора, ориентационный фактор. Результаты расчета сравнивались с экспериментальными результатами по переносу энергии для системы коллоидная квантовая точка-краситель в полимерной матрице. Было показано, что модель адекватно описывает экспериментальные результаты. Построенная модель может быть использована для расчета переноса энергии и интерпретации результатов эксперимента для широко круга подобных объектов, включая случаи со сложной стехиометрией.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант МК-995.2022.1.2).

Список литературы

1. T. Förster. Transfer mechanisms of electronic excitation energy // *Radiat. Res. Suppl.*, vol. 2, pp. 326-339, 1960.
2. L. Wu, C. Huang, B.P. Emery, et.al. Förster resonance energy transfer (FRET)-based small-molecule sensors and imaging agents // *Chem. Soc. Rev.*, vol. 49, pp. 5110-5139.
3. G. Devatha, A. Rao, S. Roy, P.P. Pillai. Förster Resonance Energy Transfer regulated multicolor photopatterning from single quantum dot nanohybrid films // *ACS Energy Lett.*, vol. 4, pp. 1710-1716.
4. A.J.P. Teunissen, C. Pérez-Medina, A. Meijerink, W.J.M. Mulder. Investigating supramolecular systems using Förster resonance energy transfer // *Chem. Soc. Rev.*, vol. 47, pp. 7027-7044.
5. E. Deplazes, D. Jayatilaka, B. Corry. ExiFRET: flexible tool for understanding FRET in complex geometries // *J. Biomed. Opt.*, vol. 17, № 011005, 2012.

ДВУХЧАСТОТНАЯ ИМПЕДАНСОМЕТРИЯ СОСТОЯНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ ПРИ РАЗОГРЕВЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

К. В. Совин^{1*}, Н. В. Коваленко², О.А. Рябушкин²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, Российская Федерация, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
141120, Российская Федерация, Фрязино, пл. Введенского, д. 1

*E-mail: sovink@yandex.ru

Применение лазерных технологий в медицине требует развития методов контроля состояния биологических тканей. Мы представляем новый метод диагностики состояния биологических тканей в процессе их локального лазерного нагрева, основанном на измерении кинетик электрического импеданса образца на 2-х характерных частотах: 40 кГц и 3 МГц. Данный подход позволяет одновременно контролировать температуру и степень повреждения биологической ткани в процессе воздействия.

Последние годы идет активное развитие медицинских применений лазерного излучения в хирургии [1]. Большая область хирургических применений основана на локальном разогреве биологических тканей излучением, например, рез лазерными скальпелями, косметический фототермолиз или коагуляция раковых опухолей [2].

Важной задачей лазерной хирургии является развитие методов проведения операций с одновременным контролем эффектов, происходящих в облучаемой ткани: абляции, вапоризации, коагуляции, гипертермии и пр. Например, при работе лазерного скальпеля, часть ткани должна быть аблирована, для создания реза, в то же время окружающая область должна быть коагулирована, для предотвращения процесса кровотечения, при этом карбонизация должна быть минимальна или отсутствовать, т.к. она приводит к замедлению восстановления ткани. Одним из подходов к данной задаче может выступать измерение электрических радиочастотных (РЧ) свойств ткани, тесно связанных с её температурой и физиологическим состоянием.

Биологические объекты являются в высокой степени гетерогенными средами, что приводит к спектральной зависимости электрического импеданса, в которой выделяют три характерные области: α -дисперсия ($\sim 10^1$ – 10^3 Гц); β -дисперсия ($\sim 10^2$ – 10^6 Гц), связанная с поляризацией слабо проводящих биологических мембран клеток и органелл; γ -дисперсия ($\sim 10^9$ – 10^{12} Гц). Разрушение биологических мембран приводит к значительному спаду импеданса на низкочастотной границе области β -дисперсии [3], при этом на её высокочастотной границе изменение импеданса обусловлено только нагревом ткани, сопровождающимся повышением ионной проводимости.

В данной работе мы представляем новый метод контроля состояния биологической ткани в процессе локального разогрева оптическим излучением, основанный на измерении временных зависимостей (кинетик) РЧ импеданса на 2-х частотах: 40 кГц и 3 МГц, находящихся, соответственно, на низкочастотной и высокочастотной границах β -дисперсии исследуемого образца.

С использованием предложенного метода проводились измерения и анализ кинетик импеданса печени цыплят бройлеров (*Gallus domesticus*). Экспериментальная установка (рис. 1а) включала в себя лазер с неполяризованным непрерывным излучением мощностью до 6 Вт на длине волны 1064 нм и двухэлектродный зонд, импеданс которого измерялся по следующей схеме: сигнал с РЧ-генератора напряжения (РЧГ) через электроды подавался на ткань. Ток через электроды вычислялся по величине напряжения на нагрузочном сопротивлении R_{load} , полученным с помощью синхронного детектора (СД). Влияние контактного импеданса исключалось на этапе обработки данных.

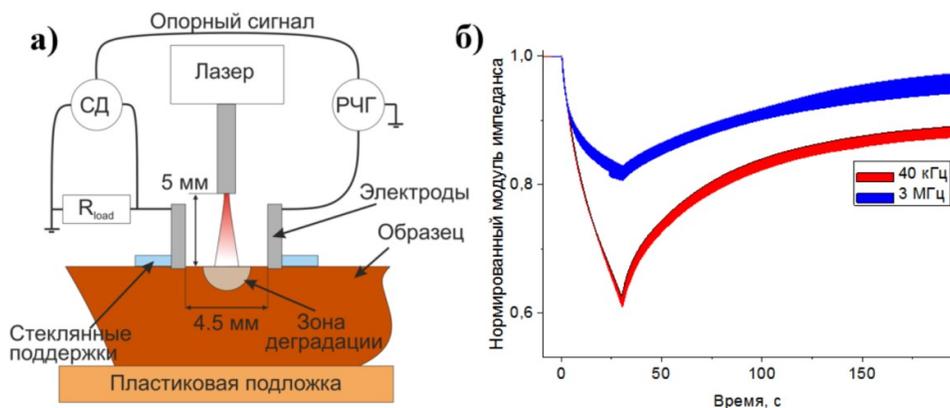


Рис. 1. а) Блок-схема экспериментальной установки. б) Кинетики нормированного модуля импеданса при мощности 6 Вт, диаметре гауссова пучка на поверхности ткани 50 мкм и длительности облучения 30 с.

На рис. 1б приведены кинетики модуля импеданса, нормированного на начальные значения, при мощности облучения 6 Вт и длительности 30 с. Ширина линии графиков отображает среднеквадратичное отклонение на основе пяти экспериментов, проведенных на каждой частоте.

На начальном этапе облучения (0–5 с) кинетики на обеих частотах совпадают, что соответствует разогреву ткани в отсутствие деградации. При дальнейшем разогреве (6–30 с) низкочастотный импеданс, за счет вклада деградации, уменьшается значительно быстрее высокочастотного. После выключения лазера (30–200 с) образец начинает остывать, и импеданс, соответственно, увеличивается, при этом высокочастотная кинетика практически достигает исходного значения, что показывает обратимый характер регистрируемого процесса; низкочастотная же составляющая выходит на отличное от исходного значение, характеризующее степень необратимой деградации ткани.

Таким образом, на основе измерений импеданса на двух различных частотах в низкочастотной ($\sim 10^4$ Гц) и высокочастотной ($\sim 10^6$ Гц) областях β -дисперсии исследуемого образца возможен одновременный контроль его степени деградации и температуры при разогреве оптическим излучением. Этот подход даёт новые возможности диагностики состояния биологических тканей в лазерной хирургии.

Данная работа была проведена в рамках государственного задания.

Список литературы

1. E. Khalkhal, M. Rezaei-Tavirani, M. R. Zali, and Z. Akbari, 'The Evaluation of Laser Application in Surgery: A Review Article // J Lasers Med Sci, vol. 10, no. 5, pp. S104–S111, 2019.
2. Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue / eds. A. J. Welch and M. J. C. van Gemert. Dordrecht: Springer Netherlands, 958 p., 2011.
3. Y. Ando, K. Mizutani, and N. Wakatsuki, 'Electrical impedance analysis of potato tissues during drying' // Journal of Food Engineering, vol. 121, pp. 24–31, 2014.

ВЛИЯНИЕ ФОСФАТ-ИОНОВ НА ДИАНИОН-АНИОННОЕ РАВНОВЕСИЕ ФЛЮОРЕСЦЕИНА В ВОЗБУЖДЕННОМ СОСТОЯНИИ

Д.П. Суржикова, М.А. Герасимова, Е.А. Слюсарева

Сибирский федеральный университет
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
E-mail: darya19578@yandex.ru

Флуоресцеин широко используется в качестве флуоресцентного зонда на рН в биологии и медицине. Для красителя характерны реакции переноса протона в основном и возбужденном состоянии. Это приводит к смещению ионного равновесия и изменению спектров поглощения и испускания. Эффект оказывается чувствительным к концентрации протонакцепторных добавок (напр. фосфат-ионов буфера). Используя полученные ранее контуры поглощения и флуоресценции анионной и дианионных форм, были найдены константы ионного равновесия в основном и возбужденном состояниях при трех концентрациях фосфат ионов (0,1, 0,5, 1 М) в физиологическом диапазоне рН. Зависимость спектров флуоресценции от длины волны возбуждения показала конкуренцию процессов испускания и переноса протона. Увеличением концентрации фосфат-ионов до ~2,5 М можно достичь установления ионного равновесия возбужденном состоянии флуоресцеина.

Органический краситель флуоресцеин успешно применяется в качестве флуоресцентного зонда на рН в биологии и медицине. Флуорофор представлен многообразием ионных форм в широком диапазоне рН. Каждая форма имеет собственные спектральные свойства [1,2]. Наибольший практический интерес имеет моноанион-дианионная (M–D) ступень диссоциации (рК 6,3 [1]). Данная ступень приходится на диапазон рН 4÷8, характерный для физиологических, в том числе внутриклеточных, процессов. Спектры флуоресценции и структурные формулы анионной и дианионной форм, изображены на рис. 1.

Для флуоресцеина характерно явление фотопереноса протона. Данное явление представляет собой смещение ионного равновесия в кислую или щелочную область за время жизни возбужденного состояния. Эффект может быть чувствительным к различным характеристикам микроокружения, таким как, концентрация протондонорных, протонакцепторных добавок (напр. фосфат-ионов буфера). Выявление чувствительности испускания красителей к различным характеристикам микроокружения открывает новые возможности применениях флуоресцентных зондов. Целью работы являлась оценка влияния фосфат-ионов на дианион-анионное равновесие в основном и возбужденном состояниях.

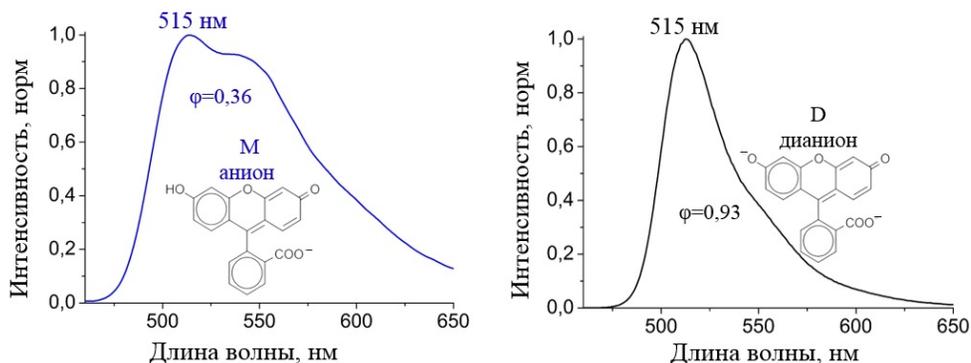


Рис. 1. Спектры флуоресценции и структурные формулы анионной и дианионной форм флуоресцеина.

Влияние фосфат-ионов на ионное равновесие было оценено путем разложения экспериментальных спектров поглощения и флуоресценции при разном рН на контуры ионных форм (дианион, анион) с определением их амплитудных вкладов и последующим построением калибровочных кривых зависимости концентрации красителя от рН.

Изменение концентрации фосфат-ионов смещает ионное равновесие как в основ-

ном, так и в возбужденном состоянии. Дополнительно, в возбужденном состоянии ионное равновесие зависит от длины волны возбуждения, что говорит о наличии конкуренции излучательных процессов и фотопереноса протона. При концентрации фосфат-ионов 2,5 М, повышается эффективность переноса протона и достигается анион-дианионное равновесие за время жизни возбуждённого состояния.

Все перечисленные факторы необходимо учитывать при использовании красителя флуоресцеин в качестве зонда на рН.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 22-22-00724).

Список литературы

1. N. Klonis, W. H. Sawyer Properties of the Prototropic Forms of Fluorescein in Aqueous Solution // *Journal of Fluorescence*, vol. 6, no. 3, pp. 147–157, 1996.

2. Д.П. Суржикова, М.А. Герасимова, Е.А. Слюсарева Протолитическое равновесие возбужденных состояний флуоресцеин // *Известия ВУЗов. Физика*, том. 64, № 11. сс. 108–114, 2021.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОРОГА ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Е. А. Трефилова^{1*}, Н.В. Коваленко², А.С. Семенов¹, О.А. Рябушкин²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, Российская Федерация, Московская обл., Долгопрудный, Институский пер., д. 9

²Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

141190, Российская Федерация, Московская обл., Фрязино, пр. Введенского, д. 1

*E-mail: trefilova.ea@phystech.edu

Исследуется механизм парообразования при прохождении лазерного излучения через тонкий слой воды, расположенный между стеклянными пластинами. На основе акустических измерений формирования и схлопывания пузырьков пара предлагается критерий, определяющий энергетический порог процесса парообразования.

На сегодняшний день активно проводятся исследования особенностей поглощения лазерного излучения в крови, лимфе и других жидкостях организма человека. Широкое распространение получило использование лазерного нагрева для облитерации варикозно-расширенных вен (эндовенозная лазерная коагуляция), лечения кист, лазерной литотрипсии и пр. [1,2]. Для проведения наиболее сложных и эффективных неинвазивных и малоинвазивных операций требуется медицинский контроль биологических тканей из зоны проведения операции. Одной из важнейших задач является создание математической модели, описывающей процесс парообразования в жидкости, которая позволит подобрать необходимые параметры лазерного излучения для медицинских приложений.

Основополагающим шагом к построению такой модели являются экспериментальные исследования поглощения и рассеяния лазерного излучения, распространяющегося в различных по составу биологических жидкостях. В частности, проводятся измерения пространственных и временных характеристик парообразования и возникающего в системе акустического отклика [1].

В данной работе экспериментально исследуется энергетический порог образования и схлопывания пузырьков пара в воде в зависимости от параметров индуцирующего лазерного излучения (мощности, длительности импульсов и диаметра пучка).

На рис. 1а представлена принципиальная схема экспериментальной установки. В работе был использован тулиевый волоконный лазер с длиной волны 1940 нм и максимальной мощностью 22,5 Вт. Излучение лазера модулировалось методом прямой модуляции оптической накачки. Сфокусированное линзой ($F = 4$ см), неполяризованное лазерное излучение направлялось на поверхность образца перпендикулярно его плоской грани. Исследуемый образец представлял собой слой дистиллированной воды (коэффициент поглощения 10 мм^{-1}) толщиной 1 мм, расположенный между двумя стеклянными пластинами (коэффициент поглощения $0,005 \text{ мм}^{-1}$) толщиной 1 мм каждое (рис. 1б). Образец был закреплен на подвижной каретке, позволяющей перемещать его вдоль вертикальной оси.

Контроль образца в процессе облучения осуществлялся скоростной камерой (Optromics CP70-1- M/C-1000), которая позволяет осуществлять съемку со скоростью 1040 кадров в секунду при разрешении изображения 1024x1280. Для подсветки была установлена лампа дневного света.

Для контроля формы и длительности лазерного импульса во время эксперимента использовался фотодетектор, регистрировавший отраженное от линзы излучение. Акустический отклик во время облучения образца регистрировался электретным микрофоном ЕСМ-66D, обладающим максимальной чувствительностью в диапазоне от 30 Гц до 20 кГц и шумом 40 дБА. Сигналы с фотодетектора и микрофона детектировались с помощью цифрового осциллографа, обладающего частотой дискретизации 1 МГц.

Основным критерием образования и схлопывания пузырька пара является нали-

чие акустического отклика. Вблизи энергетического порога положения заднего фронта отклика фотодетектора и переднего фронта акустического отклика совпадают (рис. 2а). Существование пузырьков при наличии акустического отклика также подтверждалось по данным, регистрируемому камерой.

Были получены зависимости пороговой мощности излучения тулиевого лазера, необходимой для образования пузырьков в воде при различных длительностях лазерного импульса. На рис. 2б приведены полученные экспериментальные результаты, а также аппроксимация по формуле:

$$P(t) = \frac{E/\tau}{1 - e^{-t/\tau}}$$

где P – пороговая мощность лазерного излучения на выходе из источника, t – длительность импульса, E и τ – коэффициенты аппроксимации. При малых длительностях импульса ($\tau \gg t$) формула принимает вид $E = Pt$, что позволяет связать параметр E с общей энергией необходимой для образования пузырька, а τ с характерным временем оттока тепла от области облучения. На рис.2б представлены зависимости мощности лазерного излучения от длительности импульса лазера. Параметры аппроксимации представлены в табл. 1.

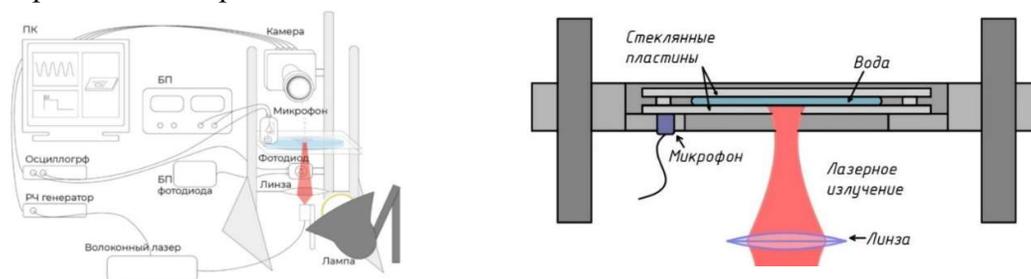


Рис. 1. а) Общий вид установки; б) Схема крепления образца

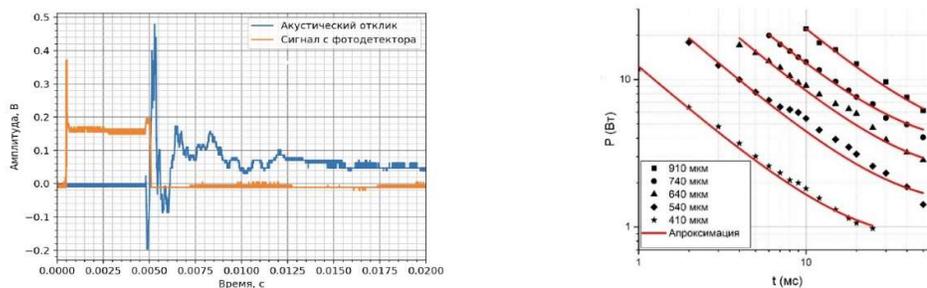


Рис. 2. а) Акустический отклик вблизи пороговой мощности; б) Зависимость мощности лазерного излучения от времени воздействия $P(t)$, необходимого для образования пузырька пара.

Таблица 1

Экспериментальные результаты для параметров E и τ

d , мм	0,82	1,08	1,28	1,42	1,82
E , Дж	12	37	72	110	201
τ , с	0,01	0,03	0,03	0,03	0,05

Список литературы

1. V.P. Minaev, N.V. Minaev, V.Yu. Bogachev, et al. Heat transfer in water under laser heating through fibres for endovenous laser coagulation // Quantum Electronics, vol. 50(8), pp. 793–800, 2020.
2. Применение лазерного излучения в урологии / А. Г. Мартов [и др.] // Лазерная медицина. – 2020. – № 24(1) – с. 57-62.

**Енисейская Фотоника – 2022.
Всероссийская научная конференция
с международным участием.**

Тезисы докладов.

Т. 2

Сдано в набор 25.08.22
Подписано в печать 03.09.22
Формат 60×84/16. Гарнитура Таймс.
Объем 6,4 усл. печ. л.
Тираж 250 экз.
Издательство ИФ СО РАН

Отпечатано в типографии И.П. Дворядкина И.Д.
г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 28, оф. 156
тел. 290-72-32, 8-963-180-99 76
e-mail: darma@akadem.ru