

Молодежная конкурс-  
конференция

**Оптические и  
информационные технологии**



**IT**

11-12 ноября 2021г.

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ СО РАН  
НАУЧНОЕ ОБЩЕСТВО ОПТИКИ И ФОТОНИКИ SPIE

ОИТ-2021  
ОПТИКА И ФОТОНИКА

Материалы  
11-й Молодежной конкурс-конференции «Оптические и  
информационные технологии 2021»

11–12 ноября 2021 г.

Новосибирск  
2021

## Оглавление

Исследование различных типов волоконных усилителей для масштабирования диссипативных солитонов С.И. Абдрахманов, А.Г. Кузнецов, Д.С. Харенко .....	5
Поляризационная терагерцовая спектроскопия С. А. Бычкова.....	7
Изучение температурной зависимости скорости звука в гидратированных фосфолипидных пленках DMPC методом рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Е.А. Добрынина, В.А. Зыкова.....	8
Применение спектроскопии комбинационного рассеяния света для исследования конформационных состояний гидрофобных хвостов в смесях DOPC/DPPC-d62/холестерин и POPC/DPPC-d62/холестерин Ю.В. Зайцева.....	10
Влияние спонтанного излучения на форму сигналов в распределенном волоконном датчике температуры на основе комбинационного рассеяния света Н.И. Калмыков, Д.А. Коваленко, И.А. Лобач .....	12
Исследование нелинейных взаимодействий между аксиально-азимутальными модами шепчущей галереи микрорезонатора на поверхности оптического волокна А.Ю. Колесникова, С.В. Сучков, И.Д. Ватник .....	14
Развитие лазерного метода исследования температуры криогенно-охлаждаемых кристаллов А.О. Коновалова.....	16

Исследование формирования лазерно-индуцированных периодических наноструктур при прямой лазерной записи ДОЭ на тонких плёнках циркония

Р.И. Куц, В.П. Корольков, А.Р. Саметов, А.И. Малышев.... 17

Визуализация физико-химических процессов в многофазных системах методом ИК-Фурье спектроскопии с матричным детектированием

Е. С. Милованов, А. С. Шалыгин, С.С. Якушкин, О. Н. Мартьянов..... 19

Создание вытянутых микроволокон для эффективного возбуждения мод шепчущей галереи микрорезонаторов методом нарушенного полного внутреннего отражения

А.Д. Новиков, Д.В. Кудашкин..... 21

Волоконный эрбиевый самосканирующий лазер с кольцевым резонатором

Н.Р. Поддубровский, И.А. Лобач, С.И. Каблуков..... 23

Фотограмметрическая оцифровка трехмерного изображения поверхности объекта, восстановленного из аналоговой изобразительной голограммы

Е. В. Рабош, Н. С. Балбекин, Н. В. Петров..... 25

Измерение потенциала плазмы в газодинамической ловушке методом доплеровской спектроскопии

А. В. Сандомирский, А.А. Лизунов..... 27

Исследование температурной зависимости коэффициента диффузии в бислоях DPPC методом восстановления флуоресценции после обесцвечивания

К.П. Сараева, К.А. Окотруб..... 29

Влияние колебаний температуры на частоту смещения $f_0$ фемтосекундного волоконного синтезатора частот А.А. Филонов, Н.А. Коляда, В.С. Пивцов, С.А. Фарносов .....	31
Распространение света в мыльной плёнке Н.С. Шаров .....	33

# Исследование различных типов волоконных усилителей для масштабирования диссипативных солитонов

**С.И. Абдрахманов<sup>1,2\*</sup>, А.Г. Кузнецов<sup>1</sup>, Д.С. Харенко<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет

\*E-mail: [s.abdrakhmanov@g.nsu.ru](mailto:s.abdrakhmanov@g.nsu.ru)

Системы, в которых реализуется режим сильночирпованных диссипативных солитонов (СЧДС) – одни из перспективных лазерных систем для получения ультракоротких импульсов с большой пиковой мощностью. Энергия импульсов в подобных системах ограничена порогом вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), при превышении которого происходит генерация шумового импульса на стоксовой длине волны, приводящая к разрушению основного импульса [1]. Дальнейшее масштабирование (увеличение энергии) импульсов связано с увеличением диаметра поля моды и использованием дополнительного усилителя. В рамках данной работы были исследованы возможности масштабирования диссипативных солитонов при помощи иттербиевых усилителей на основе тейперированного РМ (polarization maintaining) волокна и волокна с диаметром моды 10 мкм.

Схема задающего генератора СЧДС указана на Рис. 1. Резонатор реализован в кольцевой схеме и полностью состоит из РМ – волокна, за исключением участка SM – волокна, в котором происходит синхронизация мод за счёт эффекта нелинейного вращения поляризации. Накачка лазера осуществляется многомодовым лазерным диодом с выходной мощностью до 8 Вт. В качестве активной среды выступает волокно, легированное  $Yb^{3+}$ .

Средняя мощность импульсов составила 30 мВт при частоте повторения 13.62 МГц и ширине спектра в 50 нм (по -10 дБм), что значительно больше ширины в предыдущих экспериментах [2]. Длительность автокорреляционной функции (АКФ) до сжатия при помощи компрессора на паре дифракционных решёток составляет 22 пс, после - 208 фс.

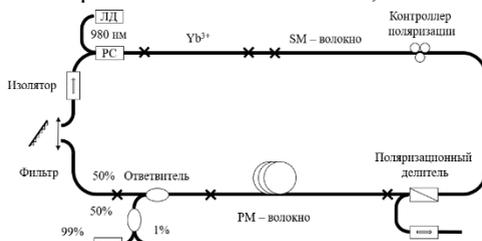


Рис. 1 Схема задающего генератора

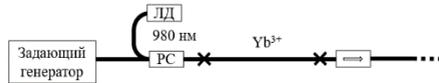


Рис. 2 Схема усилителя на основе иттербиевого волокна с 10 мкм диаметром моды

Далее было проведено усиление излучения задающего генератора при помощи усилителя на основе волокна, легированного  $Yb^{3+}$ , с 10-мкм диаметром поля моды (см. Рис. 2). Максимальная мощность сигнала составила 4.26 Вт при 14.2 Вт накачки усилителя. При этом спектр сигнала значительно уширился (до 250 нм по -10 дБм) за счёт эффекта ВКР. АКФ усиленного сигнала соответствует стохастическому режиму.

Также было произведено усиление сигнала при помощи тейперированного РМ - волокна, легированного  $Yb^{3+}$ , с диаметром поля моды равном 8.7 мкм на входе и 27 мкм на выходе (см. Рис. 3). При 26.5 Вт накачки тейперированного волокна мощность усиленного сигнала равна 10.1 Вт, а ширина спектра 30 нм (-10 дБм) без видимого влияния ВКР. Дифференциальная эффективность составляет 35%.

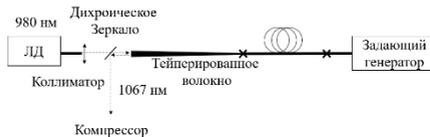


Рис. 3 Схема усилителя на основе тейперированного волокна

Таким образом в данной работе была продемонстрирована возможность усиления диссипативных солитонов при помощи волокна с диаметром моды 10 мкм и тейперированного РМ – волокна. В первом случае удалось усилить сигнал до 4.26 Вт, при этом наблюдалось сильное влияние ВКР, что делает дальнейшее сжатие подобного сигнала затруднительным. Во втором случае сигнал был усилен до 10.1 Вт, при этом, исходя из спектра, достижение порога ВКР не наблюдается. Измерение временных характеристик данного усиленного сигнала и его сжатие являются целями наших дальнейших исследований.

## Литература

- [1] Kharenko D. S. et al. 20 nJ 200 fs all-fiber highly chirped dissipative soliton oscillator //Optics letters. – 2012. – Т. 37. – №. 19. – С. 4104-4106.
- [2] Кузнецов А. Г., Харенко Д. С., Гонта В. А. Усиление диссипативных солитонов тейперным волоконным усилителем //Прикладная фотоника. – 2017. – Т. 4. – №. 3. – С. 229-236.

# Поляризационная терагерцовая спектроскопия

С. А. Бычкова<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет

<sup>2</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН

\* E-mail: [sonya.bychkova@mail.ru](mailto:sonya.bychkova@mail.ru)

Работа посвящена разработке поляризационного кристаллооптического метода исследования в терагерцовом (ТГц) диапазоне. Относительно оптической области трудность в его реализации связана с отсутствием высококонтрастных поляризаторов ( $>10^5$ ) и использованием детектора напряженности оптического поля, а не интенсивности. В связи с чем, целью работы является исследование свойств используемых «неидеальных» терагерцовых поляризаторов в составе системы поляризационной спектроскопии и поиск способа их точной настройки и установки.

Для апробации предложенного метода выполнены исследование поворота оптических осей кристаллов, имеющих разный тип сингонии (LBO, VBO и GUNP). С использованием ранее экспериментально измеренных свойств поляризаторов (коэффициенты пропускания для собственных поляризаций) и исследуемых кристаллов (показатели преломления и коэффициенты поглощения) с помощью формализм Мюллера [1], изменение сигнала в зависимости от поворота скрещенных поляризаторов, которое согласуется с экспериментальным измерением.

В ходе исследования частотна дисперсия угла поворота главных оптических осей в кристаллах LBO и VBO не наблюдается с точностью до погрешности. Для кристалла GUNP в диапазоне от 300 до 850 ГГц обнаружена линейная дисперсия  $2,3^\circ$  на 100 ГГц.

## Литература

[1] Е. Ф. Ищенко, А. Л. Соколов. Поляризационная оптика, 2-е издание, Изд-во Физматлит, 2012. – 456с.

# **Изучение температурной зависимости скорости звука в гидратированных фосфолипидных пленках DMPC методом рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.**

**Е.А. Добрынина<sup>1\*</sup>, В.А. Зыкова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт Автоматики и Электрометрии СО РАН*

*\*E-mail: [e.dobrynina@g.nsu.ru](mailto:e.dobrynina@g.nsu.ru)*

Синтетические фосфолипиды, являющиеся модельными системами биологических мембран, активно исследуются в настоящее время. Молекулы фосфолипида состоят из полярной головки и гидрофобного углеводородного хвоста и в присутствии воды формируют двойной слой. В зависимости от температуры бислоем может находиться в гелевом состоянии (углеводородные хвосты упорядочены), либо разупорядоченном состоянии флюида. Температура перехода из гелевого состояния во флюидное зависит от вида фосфолипидной молекулы и является важной характеристикой бислоя.

Характеристики и свойства фосфолипидных систем исследуются с использованием различных методик: ИК-спектроскопия, комбинационного рассеяния света, рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, ДСК и др. Спектроскопия рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (РМБ) - это бесконтактная оптическая методика, которая дает информацию о вязкоупругих характеристиках материала в гигагерцовом диапазоне. Как правило, при исследовании липидных систем объектами исследования является водная суспензия многослойных везикул. Однако, с целью уменьшения водяного вклада, а также для детального моделирования клеточной мембраны, все чаще применяются упорядоченные планарные системы.

В работе [1] метод РМБ был использован для исследования температурного поведения упругих свойств планарного образца фосфолипида димиристоилфосфатидилхолин (DMPC) в геометрии обратного рассеяния света. Результаты исследования показали нетривиальное поведение скорости звука при низких температурах, указывающее на то, что даже при температурах ниже перехода гель-флюид наблюдаются эффекты дополнительного упорядочения углеводородных хвостов. Применяемая в работе геометрия рассеяния в случае упорядоченных образцов дает информацию о свойствах образца в направлении ортогональном к бислою. Поскольку свойства планарных фосфолипидов в ортогональном и латеральном (вдоль слоев) направлениях могут различаться, интересно исследовать также температурное поведение упругих характеристик вдоль бислоя. Именно это является задачей настоящего исследования.

Изучение латеральных упругих свойств образца DMPC было реализовано с помощью геометрии рассеяния 90А [2]. Преимуществом данной геометрии является возможность определения упругих свойств среды без использования показателя преломления. Упругие свойства пленок DMPC были исследованы в широком диапазоне температур от 90 до 320 К. Полученные результаты свидетельствуют о том, что характер зависимостей скоростей звука для различных геометрий схож, однако, в латеральном направлении значение скорости звука заметно меньше, чем в ортогональном направлении.

Научный руководитель: с.н.с. ИАиЭ СО РАН, к.ф.-м.н., Зыкова В.А..

### **Литература**

[1] Zykova V. A., Adichtchev S. V., Surovtsev N. V. Effect of the Hydrocarbon Chain Disorder in Phosphatidylcholine Bilayers on Gigahertz Sound Velocity //The Journal of Physical Chemistry B. – 2020. – Т. 124. – №. 41. – С. 9079-9085.

[2] Speziale S. et al. Sound velocity and elasticity of tetragonal lysozyme crystals by Brillouin spectroscopy //Biophysical journal. – 2003. – Т. 85. – №. 5. – С. 3202-3213.

# **Применение спектроскопии комбинационного рассеяния света для исследования конформационных состояний гидрофобных хвостов в смесях DOPC/DPPC-d62/холестерин и POPC/DPPC-d62/холестерин**

**Ю.В. Зайцева<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН*

<sup>\*</sup>*E-mail: [julmari3@mail.ru](mailto:julmari3@mail.ru)*

Важной особенностью плазматической мембраны является образование липидных рафтов – функциональных микродоменов, вовлеченных во многие процессы жизнедеятельности клетки. Так как клеточная мембрана имеет очень сложный состав и структуру, для понимания некоторых фундаментальных свойств липидного бислоя часто исследуют достаточно простые модельные мембранные системы. В модельном бислое, образованном фосфолипидами и холестерином, также возможно неоднородное распределение компонентов, формирование областей с различным липидным составом и фазовым состоянием.

Считается, что фазовое разделение характерно для смесей, включающих ненасыщенный фосфолипид, насыщенный фосфолипид и холестерин, например, для смесей DOPC/DPPC/холестерин и POPC/DPPC/холестерин. Несмотря на то, что эти смеси достаточно широко исследованы, нет единого мнения о том, насколько разупорядоченными оказываются гидрофобные хвосты молекул в бислое, не до конца понятно состояние отдельных компонентов смеси.

В данной работе многослойные везикулы смесей DOPC/DPPC/холестерин и POPC/DPPC/холестерин были исследованы методом комбинационного рассеяния света. Насыщенный липид DPPC бел заменен на его аналог с полностью дейтерированными хвостами DPPC-d62. Это позволило избежать перекрытия линий в спектрах и независимо анализировать состояние насыщенного и ненасыщенного липидов.

Состояние ненасыщенного фосфолипида (DOPC или POPC) определялось по линии CH<sub>2</sub> twist колебаний. Эта линия чувствительна к упорядоченности липидных хвостов, и ее интенсивность резко растет при переходе в гелевую фазу. Однако при комнатной температуре для любых соотношений компонентов смесей заметного увеличения интенсивности линии CH<sub>2</sub> twist колебаний не наблюдается. Это значит, что ненасыщенный липид всегда остается конформационно разупорядоченным, что несколько расходится с наиболее распространенными представлениями фазовом состоянии подобных смесей.

Состояние насыщенного дейтерированного липида DPPC-d62 определялось по линии C-C all-trans колебаний на частоте  $\sim 985$  см<sup>-1</sup>. По интегральной интенсивности этой линии можно не только качественно описать состояние бислоя, но и количественно определить долю липидных хвостов в упорядоченном состоянии. В работе показано, что при добавлении ненасыщенного липида и холестерина происходит постепенное разупорядочение молекул DPPC-d62.

Таким образом, на фазовых диаграммах можно выделить область, где бислой целиком находится в разупорядоченной флюидной фазе. В остальной части фазовой диаграммы ненасыщенный липид (DOPC или POPC) всегда остается в разупорядоченном состоянии, в то время как для некоторой доли молекул насыщенного липида (DPPC-d62) наблюдается значительное конформационное упорядочение.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-12-00127

# Влияние спонтанного излучения на форму сигналов в распределенном волоконном датчике температуры на основе комбинационного рассеяния света

**Н.И. Калмыков<sup>1,2</sup>, Д.А. Коваленко<sup>3</sup>, И.А. Лобач<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*

<sup>3</sup>*ООО СибСенсор, г. Новосибирск*

\**E-mail: [lobach@iae.nsk.su](mailto:lobach@iae.nsk.su)*

Волоконно-оптические распределенные датчики температуры (РДТ) на основе эффекта комбинационного рассеяния света являются одними из самых перспективных приборов для измерения профилей температуры протяженных объектов. Информация о распределении температуры вдоль волокна содержится в антистоксовом отклике комбинационного рассеяния коротких импульсов. Для исключения влияния потерь на распространение, как правило, анализируется отношение антистоксовой к стоксовой составляющей обратно-рассеянного сигнала. Одним из подходов увеличения отношения сигнал-шум является применение мощных импульсных лазерных источников. Часто для достижения высокой пиковой мощности используется схема – задающий малоомощный импульсный лазер и волоконный эрбиевый усилитель. Недостаток такого подхода – формирование спонтанного излучения между зондирующими импульсами. В работе исследуется влияние спонтанного сигнала, формируемого в эрбиевом усилителе, на искажения форм рефлектограмм РДТ.

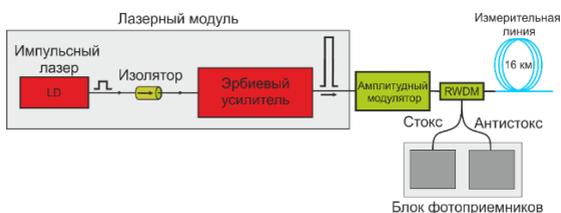


Рис. 1. Схема распределенного датчика температуры со спектральной фильтрацией излучения

Исследовалась распределенная система с длиной линии 16 км. Источник зондирующего излучения прибора состоял из импульсного лазера на длине волны 1550 нм и эрбиевого усилителя. Усиленное импульсное излучение вводилось через спектрально-селективный фильтр в линию многомодового

волокна (16 км), находящуюся при постоянной температуре. Анализировались рефлектограммы от обратно-рассеянного сигнала на стоксовой и антистоксовой длинах волн. Было обнаружено, что доля паразитного спонтанного излучения в усиленном сигнале может достигать до 50% от полной мощности. При этом наблюдалось, что рефлектограммы имеют отклонения от теоретических экспоненциальных зависимостей [1]. Для спектральной фильтрации зондирующего излучения использовался амплитудный модулятор в трех режимах работы: 1) без модуляции 2) выделение только зондирующих импульсов (1550 нм) и 3) выделение только спонтанного излучения. На рисунке 2 показаны спектры, соответствующие этим режимам.

В частотности, результаты показали, что рефлектограмма от спонтанного излучения (Рис.2б) имеет не постоянный характер и имеет минимум. Было установлено, что спонтанное излучение тоже испытывает комбинационное рассеяние света и вносит вклад в значения интенсивностей для комбинационных компонент.

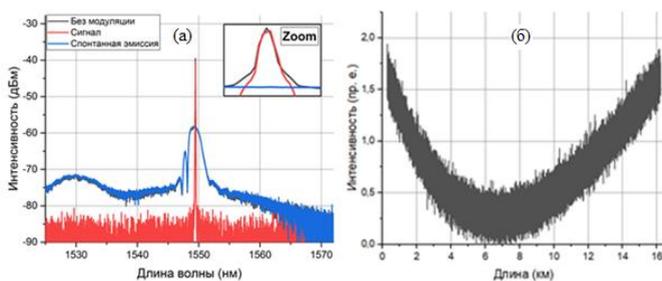


Рис. 2 (а) Спектр зондирующего излучения на выходе модулятора в различных режимах модуляции. (б) Рефлектограмма на антистоксовой длине волны от спонтанного излучения.

## Литература

- [1] Hartog A., An Introduction to distributed optical fibre sensors, CRC Press (2017)

# Исследование нелинейных взаимодействий между аксиально-азимутальными модами шепчущей галереи микрорезонатора на поверхности оптического волокна

**А.Ю. Колесникова<sup>1\*</sup>, С.В. Сучков, И.Д. Ватник**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет

\*E-mail: [a.kolesnikova@ngsu.ru](mailto:a.kolesnikova@ngsu.ru)

Генерация оптических частотных гребенок (ОЧГ) в микрорезонаторах с частотным интервалом менее 100 ГГц является актуальным направлением исследований, поскольку ОЧГ позволяют создавать стандарты частоты и имеют приложения в прецизионной частотной метрологии, обработке оптических сигналов и т.д.

Одной из возможных платформ для генерации ОЧГ такого типа является микрорезонатор мод шепчущей галереи (МШГ), распространяющихся вдоль границы стандартного оптического волокна со специально разработанной вариацией эффективного радиуса в нанометровом масштабе. Источником МШГ в данной системе выступает микроволокно ввода/вывода, расположенное перпендикулярно к оси микрорезонатора. При этом МШГ испытывают медленное аксиальное распространение и могут локализоваться вдоль оси волокна в области вариации радиуса [1].

В отличие от кольцевых микрорезонаторов, где частотный интервал определяется спектральным расстоянием между азимутальными модами [2], в цилиндрическом микрорезонаторе азимутальная мода расщепляется на несколько аксиальных мод, в зависимости от формы профиля вариации радиуса. При этом область свободной дисперсии для аксиальных мод может составлять сотни мегагерц и меньше, что является важной характеристикой микрорезонаторов данного типа для генерации оптической гребенки с низкой частотой повторения за счет керровской нелинейности [3].

Электрическое поле в условиях нанометровой вариации радиуса и медленного распространения света вдоль оси волокна  $z$  может быть представлено в следующем виде:

$$\vec{E} = \sum_m A_m(z, t) \exp(i\omega_m t) \vec{e}_{m,p}(x, y) + c.c., \quad (1)$$

где  $A_m(z, t)$  – амплитуда азимутальной моды с частотой  $\omega_m$ ,  $m$  и  $p$  – азимутальное и радиальное квантовые числа соответственно,  $\vec{e}_{m,p}(r, \varphi)$  – пространственное распределение моды в сечении волокна. Используя анзац (1) для электрического поля, из уравнений Максвелла была выведена система уравнений динамики распространения азимутальных мод  $A_m(z, t)$ , связанных керровской нелинейностью, локализованных вдоль оси  $z$  в

области ненулевого потенциала, определяемого профилем вариации радиуса. В модели рассматривается распространение одной радиальной моды, имеющей максимум распределения вблизи поверхности волокна, так как она имеет наибольший интеграл перекрытия с источником излучения.

В качестве примера была исследована система из 11 азимутальных мод. Для создания ОЧГ рассматривался параболический потенциал, который характеризуется эквидистантностью энергетических уровней, следовательно, и аксиальных мод, при этом спектральная высота потенциала была выбрана равной спектральному расстоянию между азимутальными модами. Был проведен ряд численных экспериментов при различных мощностях излучения накачки. По результатам исследования была определена пороговая мощность излучения накачки, при которой происходит генерация азимутально-аксиальных мод, а также наблюдалась генерация стабильной ОЧГ с синхронизацией азимутальных мод (рис. 1).

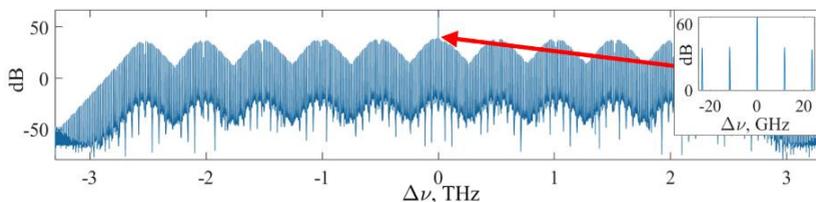


Рис. 1. Спектр излучения в микрорезонаторе в системе из 11 азимутальных мод с длиной волны накачки 1,56 мкм (191 ТГц).

Область свободной дисперсии полученной ОЧГ составила порядка 10 ГГц, что соответствует спектральному расстоянию между нечетными аксиальными модами, которое определяется формой вариации радиуса, и может быть уменьшено до сотен мегагерц и менее, что не достижимо в кольцевых резонаторах подобного размера.

## Литература

- [1] M. Sumetsky, "Nanophotonics of optical fibers," *Nanophotonics* 2(5–6), 393–406 (2013).
- [2] T.J. Kippenberg, R. Holzwarth, S.A Diddams. "Microresonator-based optical frequency combs", *Science*. 332, 555–559 (2011).
- [3] V. Dvoyrin and M. Sumetsky, "Bottle microresonator broadband and low-repetition-rate frequency comb generator", *Opt. Lett.* 41, 5547-5550 (2016).

# **Развитие лазерного метода исследования температуры криогенно-охлаждаемых кристаллов**

**А.О. Коновалова<sup>1,2\*</sup>**

<sup>1</sup> *Институт лазерной физики СО РАН*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет*

\**E-mail: [alyona.konovalova5@gmail.com](mailto:alyona.konovalova5@gmail.com)*

Данная работа посвящена развитию лазерного метода исследования температуры криогенно-охлаждаемых кристаллов [1]. Этот метод позволяет измерять температуру активных элементов (АЭ) в лазерных установках с высокой средней мощностью накачки и криогенным охлаждением. Излучение накачки в таких системах вызывает значительный неравномерный нагрев АЭ. Исследование распределения температуры активных элементов может быть использовано для оценки качества теплового контакта между АЭ и теплоотводом.

Предложены две экспериментальные схемы для исследования распределения температуры по горизонтальной оси в криогенно-охлаждаемых активных элементах лазерного усилителя с полной средней мощностью диодной накачки до 1.6 кВт [2]. Проведён анализ достоинств и недостатков предложенных вариантов, на основании которого была выбрана и разработана оптимальная схема для исследования распределения температуры. В дальнейшем будет создана экспериментальная установка для получения температурной карты активных элементов во всей области накачки для оптимизации лазерного криогенного усилителя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-02-00529-а.

## **Литература**

[1] Петров В.В., Купцов Г.В. и др. Бесконтактный метод исследования температуры в активном элементе мультидискового криогенного усилителя // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. №4. С. 358-361.

[2] Петров В.В., Петров В.А. и др. Моделирование процесса лазерного усиления с учётом зависимости теплофизических и лазерных характеристик среды от распределения температуры в активном элементе Yb:YAG // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. №4. С. 315-320.

# Исследование формирования лазерно-индуцированных периодических наноструктур при прямой лазерной записи ДОЭ на тонких плёнках циркония

**Р.И. Куц<sup>1,2\*</sup>, В.П. Корольков<sup>1</sup>, А.Р. Саметов<sup>1</sup>, А.И. Малышев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт автоматики и электрометрии СО РАН*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет*

\* *E-mail: [r.i.kuts@mail.ru](mailto:r.i.kuts@mail.ru)*

Одним из путей совершенствования технологии формирования структур дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является исключение этапов, связанных с применением жидкостного травления. Ранее были исследованы тонкие пленки циркония в качестве материала для прямой лазерной записи ДОЭ с использованием только "сухих" технологических этапов. Были обнаружены периодические наноструктуры, формирующиеся вдоль контура записывающего пятна [1]. Наноструктурированные оксидированные области имеют увеличенную эффективную высоту структур, позволяющую создавать ДОЭ избегая этапов, связанных с жидкостным травлением.

В данной работе был изучен механизм формирования лазерно-индуцированных наноструктур на тонких плёнках циркония. В качестве подложки для нанесения пленки циркония была использована стандартная кремниевая подложка с поверхностным слоем оксида 300 нм. Это позволило провести СЭМ-анализ скола, проходящего поперек наноструктурированной области. Слой SiO<sub>2</sub> был необходим, чтобы приблизить термодинамические условия формирования структур к условиям при записи на подложках из плавленного кварца, используемых обычно для ДОЭ.

Исследование показало, что лазерная запись на пленке циркония, нанесенной на кремниевую подложку с поверхностным оксидом, также приводит к образованию периодических наноструктур. По результатам СЭМ-анализа была выдвинута гипотеза о механизме формирования наноструктур на границе записывающего пятна. При облучении сфокусированным лазерным пучком (диаметр пятна 500 нм) металлической пленки происходит термохимическое поверхностное окисление. При этом происходит объемное уширение слоя металла при окислении. Согласно соотношению Пиллинга-Бедворса, считая, что уширение происходит изотропно, линейное уширение окисленной области пленки циркония может достигать ~120 нм. Возникает локальное отслоение оксидированной

пленки на границе лазерного пятна. При сканирующей записи происходит образование периодических наноструктур вдоль траектории лазерного пятна. Период структур получается равным шагу сканирования (как правило, использовался шаг 250 нм). Такое периодическое наноструктурирование приводит при отражении света к сдвигу фазы, эквивалентному отражению от рельефа высотой до сотен нанометров. Подробное изучение влияния наноструктур на оптические характеристики дифракционных зон является предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 17-19-01721-П.

Научный руководитель – д. т. н. В.П.Корольков

### **Литература**

[1] V.P. Korolkov, R.I. Kuts, A.I. Malyshev, A.E. Matochkin., R.V. Shimansky, "Dry" method for the formation of reflective phase DOEs using direct laser writing on thin Zr films // Proc. SPIE 11551, Holography, Diffractive Optics, and Applications, 115511O (2020)

**Визуализация физико-химических процессов  
в многофазных системах методом ИК-Фурье  
спектроскопии с матричным детектированием**  
**Е. С. Милованов<sup>1,2\*</sup>, А. С. Шалыгин<sup>2</sup>, С.С. Якушкин<sup>2</sup>,  
О. Н. Мартьянов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Новосибирский государственный университет*

<sup>2</sup>*Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН*

*\*E-mail: [milovanov\\_2013@mail.ru](mailto:milovanov_2013@mail.ru)*

Явления, происходящие в многокомпонентных системах, во многом определяются свойствами системы на микроскопических масштабах. Для создания модели, которая бы имела предсказательную силу при описании кинетики химических реакций, процессов массопереноса и селективности процесса в целом, необходимо располагать большим количеством информации. Например, данными о локальных концентрациях компонентов и пространственной неоднородности их распределения, локальной вязкости, коэффициентах диффузии и динамики межфазных границ в условиях реального процесса, которые в конечном итоге определяются межмолекулярными взаимодействиями. В этой ситуации принципиальным становится развитие и адаптация физико-химических методов для исследования многокомпонентных многофазных систем на микроскопическом уровне с пространственным разрешением.

Уникальные возможности для подобных исследований в области катализа и химической технологии открывает развитие неинвазивного метода ИК-Фурье спектроскопии с матричным детектированием. Применение матричного детектирования позволяет получать спектральные картины с пространственным разрешением по всей площади образца на всех этапах изменения системы. Это открывает пути к изучению неоднородных систем и их динамики с временным разрешением в условиях интенсивного массопереноса и/или протекания химической реакции [1].

Матричное детектирование может применяться при работе как в режиме «пропускания», так и в режиме «отражения», основанном на явлении нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Режим НПВО имеет преимущества для слабопрозрачных и непрозрачных сред [2], а также предъявляет не высокие требования к пробоподготовке, что существенно упрощает эксперимент.

В докладе сообщается о результатах разработки и адаптации метода ИК-Фурье спектроскопии с матричным детектированием для исследования процессов экстракции с использованием сверхкритического CO<sub>2</sub> и процессов агрегации и седиментации асфальтенов, в том числе в проточном

режиме. В частности, визуализирована фазовая и химическая неоднородность экстракта кофейного зерна (рис.1). Разработаны подходы к химической визуализации в режиме «пропускания» неоднородности химического состава осадков тяжелых компонентов нефтей (рис.2), что позволяет уточнить механизм коагуляции и агрегации асфальтенов [3].

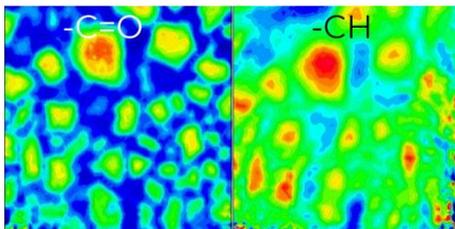


Рис. 1. Картины химической визуализации экстракта кофе в сверхкритическом  $\text{CO}_2$ , построенные по диапазонам частот  $3000\text{ см}^{-1}$  –  $2800\text{ см}^{-1}$  ( $-\text{CH}$ ),  $1765\text{ см}^{-1}$  –  $1730\text{ см}^{-1}$  ( $-\text{C}=\text{O}$ ).

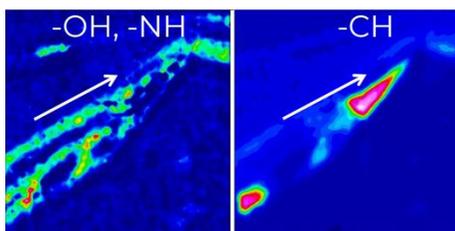


Рис. 2. Картины химической визуализации осадка асфальтенов в микрофлюидном устройстве, построенные по диапазонам частот  $3600\text{ см}^{-1}$  –  $3000\text{ см}^{-1}$  ( $-\text{OH}$  и  $-\text{NH}$ ),  $3000\text{ см}^{-1}$  –  $2800\text{ см}^{-1}$  ( $-\text{CH}$ ).

### Литература:

- [1] Kazarian S.G., Chan K.L.A. Applications of ATR-FTIR spectroscopic imaging to biomedical samples // *Biochim. Biophys. Acta - Biomembr.* 2006. Vol. 1758, № 7. P. 858–867.
- [2] Sergei G. Kazarian, Chan K.L.A. Micro- and Macro- Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopic Imaging // *Appl. Spectrosc.* 2009. Vol. 64. P. 135A-152A.
- [3] Shalygin A.S. et al. Chemical Heterogeneity of Deposits Formed in the Flocculant Flow From Crude Oil, According to FTIR Microscopy and Chemical Imaging // *Pet. Chem.* 2021. Vol. 61, № 9. P. 1011–1018.

Научный руководитель – профессор РАН, д.х.н. О. Н. Мартынов

# Создание вытянутых микроволокон для эффективного возбуждения мод шепчущей галереи микрорезонаторов методом нарушенного полного внутреннего отражения

**А.Д. Новиков<sup>1\*</sup>, Д.В. Кудашкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Новосибирский государственный технический университет*

*\*E-mail: [a.novikovb@g.nsu.ru](mailto:a.novikovb@g.nsu.ru)*

Заведение излучения методом полного нарушенного внутреннего отражения через вытянутое волокно (тейпер) – один из наиболее эффективных методов возбуждения резонатора мод шепчущей галереи (МШГ), который можно использовать для генерации оптической частотной гребенки [1]. В качестве доступного и простого типа микрорезонаторов могут использоваться стандартные оптические волокна, МШГ на поверхности которых обладают большим эффективным объемом моды  $10^{-13}\text{м}^3$  и добротностью до  $10^7$ . Пороговая мощность накачки для наблюдения нелинейных эффектов в них будет относительно высока – порядка 1 Вт. Поэтому важной задачей является создание тейперов, которые способны выдерживать высокую мощность накачки, обеспечивая при этом достаточно высокую силу связи.

Увеличение стойкости к высокой мощности можно осуществить благодаря увеличению адиабатичности формы тейпера, так как потери возникают при резком изменении радиуса тейпера. Параметры вытягивания были подобраны таким образом, что шаг вытяжки был много меньшим по сравнению с общей длиной обжига. Это позволило добиться большей адиабатичности тейпера. Благодаря этому тейперы выдерживают мощность до 2.5 Вт.

Тейпер должен обладать достаточной силой связи, чтобы в резонаторе накапливалась энергия. Мы оцениваем силу связи через измерение коэффициента передачи мощности. Для этого мы провели эксперимент (рис. 1): два одинаковых тейпера введены в контакт с резонатором

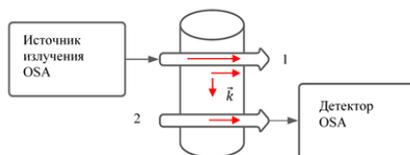


Рис. 1. Схема эксперимента для определения коэффициента передачи мощности. 1) - заводящий тейпер, 2) - принимающий тейпер

Заводящий тейпер возбуждает моды резонатора, часть из них с ненулевым аксиальным вектором распространяются вдоль резонатора и попадают в принимающий тейпер.

Измерялась выходная интенсивность  $I(z, \lambda) = \frac{I_0 C(z, \lambda)^2}{4}$ . Коэффициент связи затем определялся усреднением по длинам волн  $\langle C(z, \lambda) \rangle = \sqrt{4 \frac{I(z, \lambda)}{I_0}}$  рис. 2.

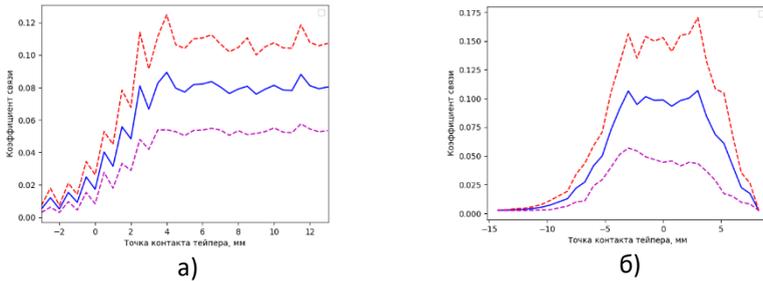


Рис. 2. Зависимость коэффициента связи от точки контакта тейпера: а) для принимающего тейпера б) для заводящего тейпера. Сплошная линия показывает усредненное значение, пунктирная – стандартное отклонение.

Коэффициент связи при приближении к перетяжке тейпера экспоненциально возрастает до 0.1 и остается постоянным вдоль большого участка (рис. 2). Коэффициент связи в центре перетяжки на 4 порядка превышает критический коэффициент связи, необходимый для оптимальной накачки микрорезонатора. При этом сила связи может быть уменьшена, если точка контакта с микрорезонатором будет отдалена от центра перетяжки. Таким образом, созданные тейперы могут быть использованы для накачки микрорезонаторов на поверхности волоконных световодов.

## Литература

- [1] Pasquazi A. et al. Micro-combs: A novel generation of optical sources //Physics Reports. – 2018. – Т. 729. – С. 1-81.
- [2] Городецкий М. Л. Основы теории оптических микрорезонаторов //М.: МГУ. – 2010.
- [3] Sumetsky M. Theory of SNAP devices: basic equations and comparison with the experiment //Optics Express. – 2012. – Т. 20. – №. 20. – С. 22537-22554.

# Волоконный эрбиевый самосканирующий лазер с кольцевым резонатором

**Н.Р. Поддубровский<sup>1\*</sup>, И.А. Лобач<sup>1</sup>, С.И. Каблуков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт Автоматики и Электронметрии СО РАН,  
г. Новосибирск*

*\* E-mail: [pod\\_nikita@iae.nsk.su](mailto:pod_nikita@iae.nsk.su)*

Среди перестраиваемых лазеров особое место занимают лазеры с самосканированием частоты, в которых перестройка осуществляется без использования селекторов и драйверов [1]. Тем не менее, самосканирование в эрбиевых активных волокнах на сегодняшний день является малоизученным. В 2020 году в эрбиевом лазере с линейным резонатором было получено самосканирование в диапазоне 2.8 нм [2]. Отличительной особенностью выходного излучения стала квазинепрерывная генерация в сравнении с импульсной генерацией в ранее описанных самосканирующих лазерах [1]. Целью настоящей работы стало исследование эффекта самосканирования в эрбиевом лазере с кольцевым резонатором.

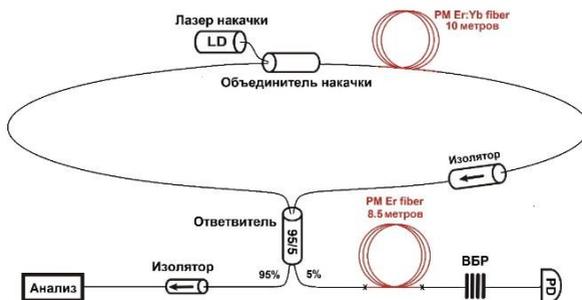


Рис. 1. Схема лазера.

Схема лазера представлена на Рис. 1. Схема реализована на основе компонентов и волокон с сохранением поляризации. Усиливающая среда лазера – Er/Yb волокно с двойной оболочкой длиной ~10 м – накачивается через объединитель накачки многомодовым диодом с длиной волны 976 нм. Изолятор предотвращает формирование динамических структур в усиливающей среде. Такие структуры формируются в эрбиевом волокне (Nufern PM-ESF 7/125 длиной 8.5 м) за счет отражения от волоконной брэгговской решетки с коэффициентом отражения 90% на длине волны 1600.5 нм. Наблюдается сканирование в диапазоне ~100 пм (Рис.2а). При этом скорость перестройки не превышает 6 пм/с, что на порядок меньше

скоростей, наблюдавшихся в предшествующих работах по самосканирующим лазерам.

Особенностью генерации является квазинепрерывная динамика интенсивности (Рис.2б), аналогичная полученной в работе [2]. Наблюдаются структуры длительностью  $\sim 10$  мс, промодулированные частотой межмодовых биений  $\sim 5.5$  МГц. Это свидетельствует об одновременной генерации двух продольных мод, как в работе [2], однако здесь длительность жизни двухмодового состояния на порядок больше. Увеличение мощности накачки приводило к замедлению сканирования, однако длительность структур становится нерегулярной. Между соседними структурами происходит сдвигка спектра на частоту межмодовых биений.

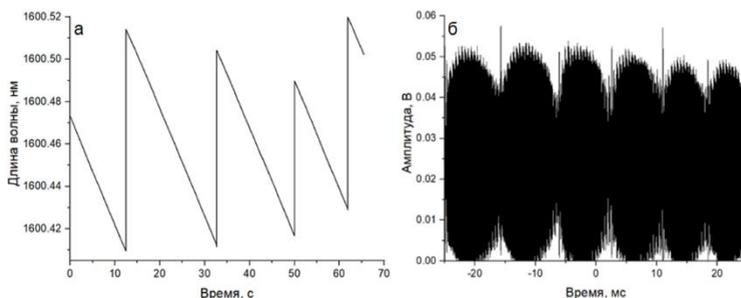


Рис. 2. Характерная динамика (а) длины волны и (б) интенсивности.

В ходе работы был продемонстрирован эрбиевый самосканирующий лазер с кольцевым резонатором. Были проанализированы его динамика интенсивности и длины волны. Двухмодовое сканирование происходит в диапазоне 0.1 нм вблизи максимума отражения используемой ВБР. При этом скорость сканирования составляет 3-4 пм/с. Ожидается, что разработанный источник может быть использован для опроса волоконных датчиков.

## Литература

- [1] Lobach I. A., et al, Opt. Express **19**, 17632–40 (2011).
- [2] Kashirina E.K., et al, Opt Lett. **45** (24), 6659-6662 (2020).

# **Фотограмметрическая оцифровка трехмерного изображения поверхности объекта, восстановленного из аналоговой изобразительной голограммы**

**Е. В. Рабosh<sup>1\*</sup>, Н. С. Балбекин<sup>1</sup>, Н. В. Петров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>\*</sup>*E-mail: rabosh.ev7@gmail.com*

Аналоговая изобразительная голография может рассматриваться как дополнительный метод хранения больших объемов данных [1]. Современные голографические материалы обеспечивают чрезвычайно высокое пространственное разрешение, которое на 1–2 порядка превышает разрешение изображений, получаемых новейшими матричными фотоприемниками [2]. Информационная емкость аналоговой голограммы превышает емкость различных твердотельных носителей [3]. Все эти особенности аналоговых изобразительных голограмм предоставляют выдающиеся возможности для сохранения большого количества информации о мельчайших деталях предметов, имеющих культурную или научную ценность [4]. Кроме того, цветные голограммы отражательного типа воспринимаются как объект искусства. Таким образом, аналоговую голографию можно считать эффективным дополнительным инструментом для решения задач длительного хранения информации об объектах культурно-исторического наследия.

Несмотря на перечисленные преимущества аналоговой изобразительной голографии, извлечь и обработать количественную информацию об объекте, записанную на голограмме, довольно сложно. Это обстоятельство серьезно ограничивает возможности аналоговой голографии как метода хранения архивной информации об объектах культурного наследия, и разработка новых простых и эффективных подходов к оцифровке информации, содержащейся в аналоговой голограмме, может снять это ограничение. Существуют подходы для оцифровки дифракционной структуры внеосевой голограммы с последующим численным восстановлением [5], но они не применимы к голограммам отражательного типа, записанным по методу Ю. Н. Денисюка. Поэтому представляет интерес разработка альтернативных подходов.

В данной работе описывается подход к оцифровке волнового фронта объекта, восстановленного из аналоговой голограммы отражательного типа с использованием метода фотограмметрии. В экспериментальной установке для записи изобразительных голограмм отражательного типа по методике Ю. Н. Денисюка использовался твердотельный лазер с диодной накачкой (DPSS-лазер) с длиной волны 640 нм. Для создания 3D модели исходного объекта камера была зафиксирована под полярным углом 45° и 90°, а объект

вращался на  $360^\circ$  вокруг своей оси. В случае 3Dh модели (где h – hologram, 3Dh – 3D модель, рассчитанная по фотографиям волнового фронта объекта, восстановленного по голограмме) камера вращалась вокруг голограммы в пределах азимутального угла от  $-60^\circ$  до  $60^\circ$  для тех же двух полярных углов. Для восстановления волнового фронта объекта был реализован точечный источник белого света. Он был установлен под углом Брюстера, чтобы воссоздать условия записи голограммы. Построение и обработка трехмерных моделей проводились с использованием программного комплекса Agisoft Metashape. Анализ полученных 3D моделей основывался на сравнении фрагментов поверхностей профилей объекта (см. Рис. 1). Полученные сечения поверхностей 3D и 3Dh моделей сравнивались между собой в соответствии с критерием корреляции Пирсона.

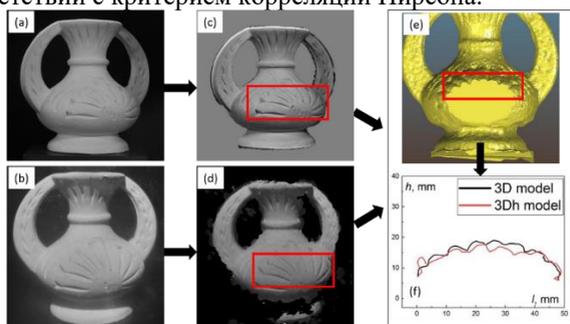


Рис. 1. Фотографии объекта «Ваза» (а) и его изображения, восстановленного из голограммы отражательного типа (б). Виды спереди для 3D (с) и 3Dh (d) моделей. Выделенные красным области на видах спереди (с) и (d) показывают фрагменты, по которым были построены профили поверхности. Область рельефа объекта для построения поперечных сечений (е) и график профиля поверхности как для 3D, так и для 3Dh моделей (f).

## Литература

- [1] Burckhardt C. В., Collier R. J., Lin L. H. Optical holography //New York,\* London, Acad. – 1971.
- [2] Gyimesi F. et al. Digital holography catching up with analogue holography both in resolution and in field of view with a bottom-line camera //Fringe 2009. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. – С. 1-6.
- [3] Haw M. Holographic data storage: The light fantastic //Nature. – 2003. – Т. 422. – №. 6932. – С. 556-559.
- [4] Gentet P., Gentet Y., Lee S. H. Ultimate 04 the new reference for ultra-realistic color holography //2017 International Conference on Emerging Trends & Innovation in ICT (ICEI). – IEEE, 2017. – С. 162-166.
- [5] Гужов В. И. и др. Восстановление изображений из реальных голограмм, зафиксированных на фотопластинках //Автоматика и программная инженерия. – 2017. – №. 1 (19).

## **Измерение потенциала плазмы в газодинамической ловушке методом доплеровской спектроскопии**

**А. В. Сандомирский<sup>1,2\*</sup>, А.А. Лизунов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет*

<sup>2</sup> *Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера*

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

Измерение электростатического потенциала плазмы в линейных магнитных ловушках важно для изучения процессов продольного переноса частиц и энергии. Именно уменьшение продольных потерь является критическим условием осуществления управляемого термоядерного синтеза (УТС) в открытой ловушке. В данной работе был использован спектроскопический метод, который имеет ряд преимуществ по сравнению с альтернативными.

Эксперименты проводились в газодинамической ловушке (ГДЛ), которая представляет собой линейную систему для удержания плазмы с аксиально-симметричной конфигурацией магнитного поля. При создании и нагреве плазмы в ГДЛ, формируется положительный электростатический потенциал, называемый амбиполярным, спадающий вдоль каждой силовой линии от максимума в центре до нуля на стенке. Такой потенциал определяется квазинейтральностью плазмы в каждой точке, а также равенством продольных токов электронов и ионов на торцевую стенку. Потенциал формирует барьер для покидающих ловушку электронов, а также ускоряет ионы, вытекающие в потоке плазмы через магнитную пробку.

В основе метода диагностики использовался эффект Доплера, основанный на изменении регистрируемой длины волны вследствие движения источника излучения относительно детектора. Чтобы конвертировать ускоренные ионы плазмы в возбуждённые атомы с последующим излучением света, использовалась водородная газовая мишень. Излучение при перезарядке на мишени собиралось оптической системой, поступало в спектрометр схемы Черни-Тёрнера с дифракционной решёткой и регистрировалось быстродействующей ПЗС-камерой. Перед измерениями в плазме ГДЛ была произведена калибровка спектральной дисперсии и аппаратной функции прибора при помощи лабораторных газоразрядных ламп H и Ne.

Были проведены измерения потенциала и ионной температуры различных компонент плазмы: основной (водородной и дейтериевой) и примеси гелия. В работе представлены спектры излучения линий H- $\alpha$  (656.28 нм) He-I (667.8 нм). Впервые были проведены измерения пространственного профиля амбиполярного потенциала в ГДЛ.

# Исследование температурной зависимости коэффициента диффузии в бислоях DPPC методом восстановления флуоресценции после обесцвечивания.

**К.П. Сараева<sup>1,2</sup>, К.А. Околюб<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт автоматики и электрометрии СО РАН*

<sup>2</sup>*Новосибирский Государственный университет*

\* *E-mail: [k.saraeva@g.nsu.ru](mailto:k.saraeva@g.nsu.ru)*

Восстановление флуоресценции после фото обесцвечивания (FRAP) - стандартная методика определения коэффициентов диффузии в различных биофизических задачах на микрометровом масштабе. Наличие дефектов и неоднородностей на различных масштабах образца, сопутствующие химические реакции влияют на диффузионный перенос [1][2]. На данный момент разработаны различные варианты численных методов FRAP эксперимента, учитывающие особенности диффузии в материалах [3][4].

Фосфолипиды - класс органических соединений, тип липидов. Благодаря особой структуре, - гидрофильная полярная головка, остаток фосфорной кислоты, и гидрофобные неполярные ацильные хвосты - фосфолипиды образуют в водной среде различные упорядоченные структуры, основой которых является бислой [5]. Реальные биологические мембраны - высоко динамические структуры, текучесть которых является важной характеристикой. Метод FRAP широко применяется в исследовании текучести фосфолипидных мембран [6].

Целью данной работы была постановка методики FRAP-эксперимента и последующее определение температурной зависимости диффузии в однокомпонентной мембране DPPC с использованием меченного DPPC-d62/Rhodamine B.

В ходе работы были исследованы различные численные модели для оценки параметров в эксперименте обесцвечивания области гауссовым лазерным пучком: с помощью стандартной кривой восстановления интенсивности [7], аппроксимация временной эволюции концентрации точным решением уравнения диффузии для начального условия гауссового распределения интенсивности, оценка параметров на основе численного решения уравнения диффузии.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-12-00127.*

## Литература

- [1] Lorén, Niklas, Magnus Nydén, and Anne-Marie Hermansson. "Determination of local diffusion properties in heterogeneous biomaterials." *Advances in colloid and interface science* 150.1 (2009): 5-15.

- [2] Sprague, Brian L., and James G. McNally. "FRAP analysis of binding: proper and fitting." *Trends in cell biology* 15.2 (2005): 84-91.
- [3] Rödning, Magnus, et al. "A highly accurate pixel-based FRAP model based on spectral-domain numerical methods." *Biophysical journal* 116.7 (2019): 1348-1361.
- [4] Jonasson, Jenny K., et al. "A pixel-based likelihood framework for analysis of fluorescence recovery after photobleaching data." *Journal of microscopy* 232.2 (2008): 260-269.
- [5] Cevc, Gregor, ed. *Phospholipids handbook*. CRC press, 1993.
- [6] Zhang, Ying, et al. "Effect of cholesterol on the fluidity of supported lipid bilayers." *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 196 (2020): 111353.
- [7] Axelrod, Daniel, et al. "Mobility measurement by analysis of fluorescence photobleaching recovery kinetics." *Biophysical journal* 16.9 (1976): 1055-1069.

# Влияние колебаний температуры на частоту смещения $f_0$ фемтосекундного волоконного синтезатора частот

**А.А. Филонов<sup>1\*</sup>, Н.А. Коляда<sup>1</sup>, В.С. Пивцов<sup>1</sup>,**

**С.А. Фарносов<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Институт Лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

*\*E-mail: [aa.filonov@mail.ru](mailto:aa.filonov@mail.ru)*

В данной работе исследовался волоконный фемтосекундный синтезатор частот (ФВСЧ)[1]. ФВСЧ совместно с оптическим стандартом частоты образует систему под названием фемтосекундные оптические часы (ФОЧ) [2], которые применяются для решения различных метрологических задач (измерение оптических частот, космическое позиционирование и др.).

Было исследовано влияние температурных колебаний на частоту и уровень сигнал/шум радиочастотного сигнала смещения оптической гребенки частот волоконного лазера  $f_0$  [3]. Радиочастотный сигнал  $f_0$  детектировался с помощью  $f$ - $2f$  интерферометра [4].

Изменение температуры воздуха внутри лабораторного помещения в течение рабочего дня составляет 2-3 °С. При этом изменение температуры под кожухом лазера составляет ~ 0,1 °С и внутри ФВСЧ ~ 0.8 °С (рис. 1).

Изменение температуры волоконного лазера на 0,1 °С приводит к изменению частоты  $f_0$  на 5 МГц. При нагреве небольшого участка эрбиевого волокна оптического усилителя на 7 °С уровень сигнала  $f_0$  в режиме стабилизации частот синтезатора [1] уменьшается на 2 дБ.

Было исследовано влияние лазерных диодов накачки (ЛДН) на сигнал  $f_0$  с помощью изменения настроек драйверов диодов. Изменение температуры ЛДН на 0,1 °С приводит к изменению частоты  $f_0$  на 100 кГц. Изменение температуры каждого из трех ЛДН оптических усилителей на 1 °С сопровождается уменьшением уровня сигнала  $f_0$  на ~ 1дБ.

При помощи термостабилизации воздуха внутри ФВСЧ с помощью резистивных нагревателей удалось уменьшить колебания температуры внутри ФВСЧ до ~ 0,1 °С и под кожухом лазера до ~ 0,05 °С в течение рабочего дня. Также при использовании резистивной термостабилизации и термостабилизации ЛДН с помощью драйверов уменьшился дрейф частоты  $f_0$  (в режиме работы ФВСЧ без стабилизации его частот) с 20 МГц до единиц МГц в течение рабочего дня, а колебания уровня сигнал/шум снизились с 10 дБ до 2 дБ.

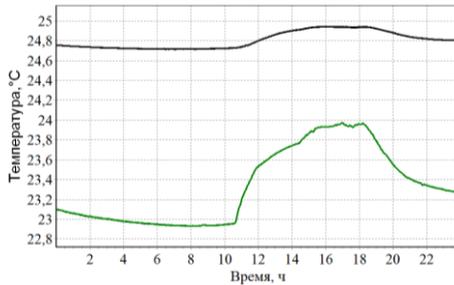


Рис. 1. Изменение температуры воздуха в течение дня в волоконном лазере (черный график), и в ФСЧ (зеленый график).

## Литература

[1] N.A. Koliada; V.S. Pivtsov et al, “Using an extra cavity acousto-optic frequency modulator to stabilize the offset frequency of the fiber optical comb generator”, Proceedings of SPIE: 2020 International Conference Laser Optics (ICLO) (Saint Petersburg, Russia, 2-6 Nov. 2020), p. 361.

[2] S. N. Bagayev, V. I. Denisov et al, “Fiber-based femtosecond optical frequency comb stabilized to iodine frequency standard”, Journal of Physics: Conf. Series **793**, № 1, 1-4 (2017).

[3] H.R. Telle, G. Steinmeyer et al, “Carrier-envelope offset phase control: A novel concept for absolute optical frequency measurement and ultrashort pulse generation”, Appl. Phys. B **69**, 327–332 (1999).

[4] Atsushi Ishizawa, Tadashi Nishikawa et al, “Efficient Carrier-Envelope Offset Locking with a Simplified Configuration of an f-to-2f Interferometer”, Japanese Journal of Applied Physics **50**, 022502 (2011).

## Распространение света в мыльной плёнке

Н.С. Шаров<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский Государственный Университет

\*E-mail: [n.sharov@gnsu.ru](mailto:n.sharov@gnsu.ru)

Постановка задачи: если направить луч лазера под малым углом на тонкую горизонтально ориентированную мыльную плёнку, внутри плёнки может появиться быстро меняющаяся картина тонких ветвящихся световых каналов. В данной работе это явление было исследовано с точки зрения оптики планарных волноводов.

Естественная неустойчивость жидкой плёнки приводит к образованию на ней областей различной толщины; размеры этих неоднородностей порядка ширины пучка лазера, а характерная толщина плёнки сравнима с длиной волны плёнки. Попадание лазерного луча в плёнку возможно через неоднородности на плёнке. Для плёнки как для планарного волновода было записано условие существования волны и получено, что в зависимости от локальной толщины плёнки могут одновременно существовать одна или несколько волноводных мод. Моды распространяются в волноводе с разным эффективным показателем преломления, возникает многомодовая дисперсия, и лазерный луч разветвляется. Была построена математическая модель многомодовой дисперсии и получен критерий образования ветвлений луча. Описание механизма разветвления лучей и вывод критериев его возникновения являются основными результатами работы. Полученные результаты хорошо согласуются с проведёнными экспериментами.

Также были проведены исследования, связанные с динамичностью изображения ветвящихся каналов света в плёнке. Было установлено, что изменение картинки обусловлено постоянным течением в плёнке и существенно зависит от вязкости. В плёнке без течений (твёрдой) «ветви света» статичны.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Ю.Л. Башкатов, доцент кафедры физики СУНЦ НГУ и ФФ НГУ

Благодарность профессору НГУ Е.И. Пальчикову за помощь с освоением оптики планарных волноводов

### Литература

[1] П. С. Зеленковский, Основы интегральной и волоконной оптики: учеб.

пособие, Изд-во Урал. ун-та, 9-33 (2019)

[2] Ю. Ю. Стойлов, Лазерный луч в мыльной пленке, УФН, том 174, номер 12, 1359–1369 (2004)

[3] Patsyk, A., Sivan, U., Segev, M. et al. Observation of branched flow of light. *Nature* 583, 60–65 (2020).

[4] Emile O., Emile J., Soap films as 1D waveguides, *De Gruyter open, Optofluid. Microfluid. Nanofluid.* 2014 1:27-33 (2014)

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

**Веб-сайт конференции:** [www.vk.com/potcon](http://www.vk.com/potcon)

# **SPIE.** **STUDENT CHAPTER**

**INSTITUTE FOR  
AUTOMATION AND  
ELECTROMETRY**



Институт автоматизации и  
электрометрии СО РАН

