



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

СБОРНИК ТРУДОВ

VIII

КОНГРЕССА  
МОЛОДЫХ  
УЧЕНЫХ

том 2



КМУ

КОНГРЕСС МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Санкт-Петербург  
2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Сборник трудов  
VIII Конгресса молодых ученых  
Том 2**



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2019

Сборник трудов VIII Конгресса молодых ученых. Том 2. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 393 с.

Издание содержит результаты научных работ молодых ученых, доложенные на VIII Конгрессе молодых ученых Университета ИТМО по тематике: прикладная фотоника.

**Председатель редколлегии:**

*Бугров Владислав Евгеньевич*

доктор физико-математических наук, доцент,

директор мегафакультета фотоники Университета ИТМО.

ISBN 978-5-7577-0603-0

ISBN 978-5-7577-0605-4 (Том 2)



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© Авторы, 2019

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### **Члены редколлегии:**

*Балега Юрий Юрьевич*  
академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор факультета прикладной оптики Университета ИТМО.

*Викторов Евгений Анатольевич*  
кандидат физико-математических наук,  
профессор факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО.

*Гуров Игорь Петрович*  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник факультета прикладной оптики Университета ИТМО.

*Карасев Никита Николаевич*  
кандидат технических наук,  
доцент факультета прикладной оптики Университета ИТМО.

*Коротаев Валерий Викторович*  
доктор технических наук, профессор,  
профессор факультета прикладной оптики Университета ИТМО.

*Мешковский Игорь Касьянович*,  
доктор технических наук, профессор,  
руководитель научно-исследовательского центра световодной фотоники  
Университета ИТМО.

*Никоноров Николай Валентинович*  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор факультета фотоники и оптоинформатики Университета ИТМО.

*Сгибнев Евгений Михайлович*  
кандидат физико-математических наук,  
инженер факультета фотоники и оптоинформатики Университета ИТМО.

*Стригальев Владимир Евгеньевич*  
доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО.

*Успенская Майя Валерьевна*  
доктор технических наук, профессор,  
профессор факультета прикладной оптики Университета ИТМО.

*Цыганок Елена Анатольевна*  
кандидат технических наук,  
доцент факультета прикладной оптики Университета ИТМО.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Издание содержит результаты научных работ молодых ученых, доложенные 15–19 апреля 2019 года на VIII Конгрессе молодых ученых Университета ИТМО по тематике: прикладная фотоника.

Конгресс проводится в целях реализации программы Национального исследовательского университета, программы повышения конкурентоспособности Университета ИТМО среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг., а также с целью стимулирования научно-технической деятельности молодых ученых, приобретения ими опыта публичных выступлений, повышения научного уровня и апробации выпускных квалификационных работ магистрантов и бакалавров за 2018/2019 учебный год.

**НАПРАВЛЕНИЕ  
ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА**

УДК 535.343.32

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО  
АНАЛИЗА ПЧЕЛИНОГО МЕДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО НАТУРАЛЬНОСТИ**

Аверьянов В.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.т.н. Васильев А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В данной работе проведены исследования спектров поглощения различных сортов пчелиного меда в видимой и ближней ИК-областях. Исследованы спектры образцов с различной концентрацией и термически обработанных проб. Определены характерные пиковые значения подсолнечникового меда.

**Ключевые слова:** спектральный анализ, мед, видимое излучение, инфракрасное излучение, спектр поглощения, метод контроля.

**Введение.** Мед является естественным натуральным продуктом, который обладает уникальными полезными свойствами. Следует отметить, что процесс получения натурального пчелиного меда – это трудоемкий процесс, связанный со значительными затратами денежных средств и времени. Последние годы спрос на качественный мед повлиял на появление на рынках фальсифицированного меда. Многие недобросовестные пчеловоды используют сахарный сироп для подкормки пчел и добавления его в мед для увеличения количества меда для реализации.

Единого стандарта определения качества меда, в данных момент в нашей стране, не существует. Поэтому проблема фальсификации меда не решена, так как нет единого подхода к определению оценки качества меда. Это сложный и трудоемкий процесс, в котором должны участвовать специальные контролирующие органы.

Способы фальсификации меда многообразны. Но следует помнить, что такой мед негативно влияет на здоровье человека. Он вызывает, в лучшем случае, отравления или аллергические реакции.

Почти в каждом российском магазине можно встретить фальсифицированный мед или суррогат. Контролирующие органы не следят за оценкой качества меда. И это превратилось в актуальную задачу. И с этим столкнулись в других странах мира.

Количество пчел в мире постепенно сокращается. Например, в Китае, это остро ощущается. Во многих провинциях приходится применять способы по ручному опылению цветов. На сокращение популяции пчел влияет мировая экология. За последние годы мир столкнулся с явлениями, опасными для всех живых организмов. Это и загрязнение воздуха, воды, накопления в почве токсичных элементов и т.д. [1].

Требования к качеству натурального меда следует ужесточить, следя за экологической чистотой регионов его происхождения.

Постепенно наш ГОСТ приближается к международным стандартам, внедряя в производство меда и его торговлю систему добровольной сертификации.

Для проверки качества меда существует множество методик, относящихся к различным областям наук и регламентирующейся ГОСТом. Также существуют народные методы [2].

Одним из способов определения и проверки качества меда возможен спектральный анализ, относящегося к оптико-электронному методу. Этот метод может стать наиболее перспективным. Его главными особенностями являются – получение моментального результата и отсутствие необходимости готовить растворы.

**Методика проведения исследования.** В качестве исследуемых объектов были использованы четыре различных наиболее распространенных сорта меда в России (период сбора май-июнь 2018): цветочный (разнотравье), гречишный, акациевый, подсолнечниковый.

По своим внешним признакам цветочный мед имеет светло-янтарный цвет, прозрачный, вязкий. Гречишный мед имеет темно-коричневый цвет, менее прозрачный, текучесть выше, чем у цветочного и акациевого. Акациевый – такой же, как цветочный, но более светлый. Подсолнечниковый мед – желтого цвета, очень вязкий, непрозрачный. У всех образцов отсутствуют признаки кристаллизации (засахаривания).

Собрана установка, представленная на рис. 1, включающая в себя источник излучения, кювету с образцом, спектрометр (Ocean Optics USB4000, стандартное ПО Spectra Suite), передача светового излучения от кюветы до спектрометра осуществлялась по световоду [3].

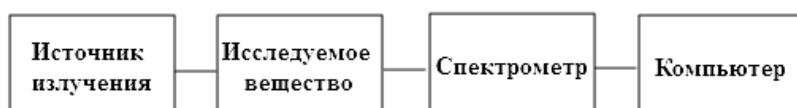


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки

В качестве источника излучения служили два светодиода. Спектры излучения, которых лежат в пределах 400–680 нм и 880–980 нм. Пробы меда помещались в кювету, толщина слоя не превышала 1,5 мм.

Измерения проводились 3–5 раз для каждого сорта меда с различными концентрациями. При комнатной температуре 20–25°C. Измерения для видимой области и узкой части ближней ИК-области спектра велись отдельно. Исследуемые диапазоны длин волн 410–670 нм и 890–970 нм. Сужение исследуемых диапазонов связано с повышением шумовой составляющей, так как интенсивность излучения диодов на краю спектров слишком мала. Время экспонирования для всех измерений одинаковое – 100 мс.

1. Исследование спектров поглощения меда. Полученные данные для видимой области, представленные на рис. 2, показали, что все образцы имеют схожую кривую спектра. А именно, максимумы поглощения приходятся на 420–430 нм, затем кривая спектра монотонно убывает. Однако спектр подсолнечного меда имеет два характерных максимума поглощения в диапазоне 430–450 нм и 510–520 нм длин волн и один слабовыраженный максимум 560 нм.

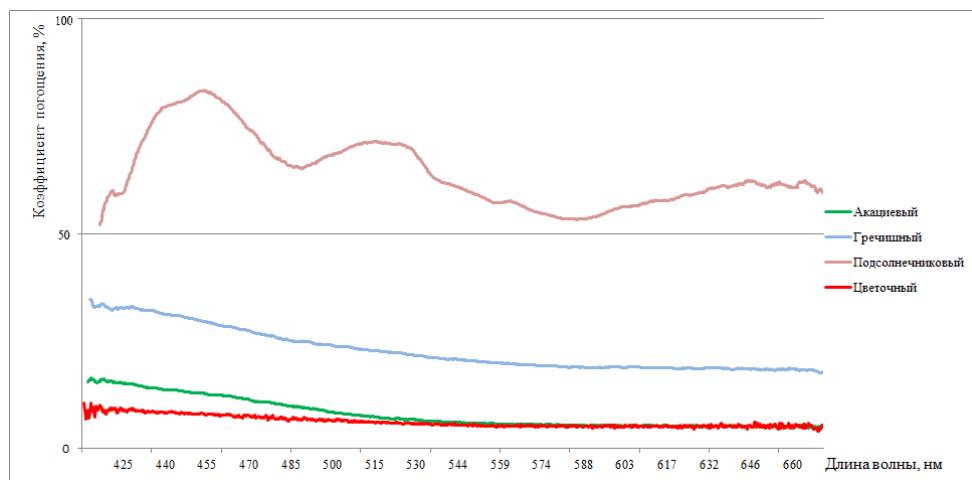


Рис. 2. Спектры поглощения меда в видимой области

Рис. 3 включает в себя данные о поглощении проб подсолнечника с различными концентрациями. Важно отметить, что графики имеют качественный характер, так как данные объединены из разных калибровок. Данные для узкого ИК-диапазона в пределах 890–970 нм следующие:

- в диапазоне 890–940 нм не имеют никаких особых пиковых характеристик, графики монотонны;
- в диапазоне 940–970 нм, графики начинают медленно возрастать, что говорит об увеличении поглощения. Отсюда можно сделать вывод, что в ближней ИК-зоне могут быть пиковые значения.

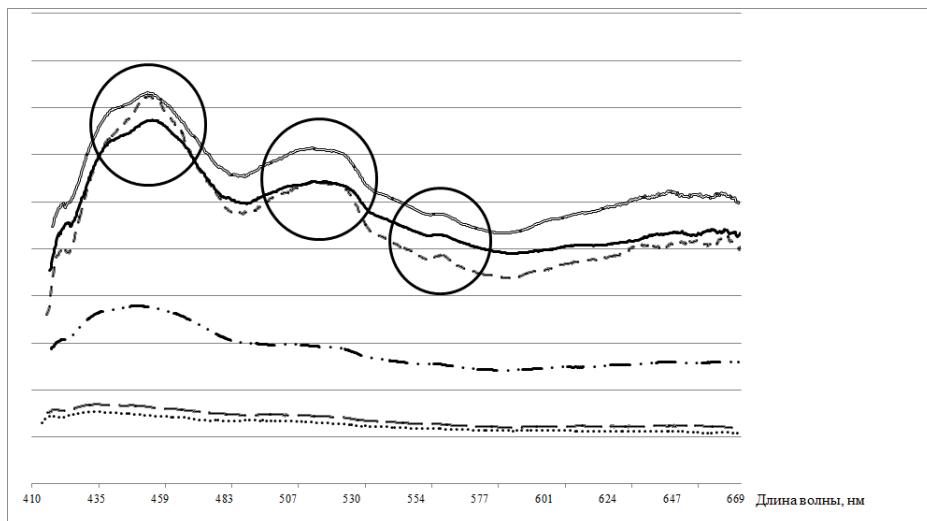


Рис. 3. Качественные спектры поглощения подсолнечникового меда

2. Исследование спектров поглощения меда с различной концентрацией. Концентрация меда уменьшалась путем добавления воды пропорционально объему меда. Для каждого сорта меда были приготовлены растворы 75% меда+25% воды, 50% меда 50% воды, 25% меда+75% воды. Полученные в исследуемом диапазоне длин волн спектры поглощения не дали никаких результатов. При добавлении воды в раствор, наблюдалось снижение поглощательной способности. Также наблюдалось сглаживание спектров. Различить сорта меда стало невозможно, даже для подсолнечного меда. Аналогичная ситуация возникает при добавлении сахарного раствора.
3. Исследование спектров поглощения термически обработанного меда. Перед снятием данных, исследуемые образцы были подвержены нагреванию в течение 10 мин до температуры 50°C и тщательно перемешивались. Известно, что при этой температуре, мед начинает терять свои полезные свойства [4]. Нагревание осуществлялось путем погружения тары с медом в разогретую воду. Показания снимались с остуженных до комнатной температуры образцов. В результате, полученные спектры поглощения остались без изменений по сравнению с исходными.

**Заключение.** Проведенное исследование показало, что в заданных областях спектры поглощения меда не имеют характерных точек, по которым можно точно установить критерий их натуральности. Однако установлено, что спектр поглощения подсолнечникового меда отличается от остальных сортов.

Известно, что подсолнечниковый мед является самым дешевым медом, и зачастую недобросовестные пчеловоды выдают его за другой сорт или разбавляют им иные сорта. В дальнейшем будет проведено исследование спектров перемешанных сортов меда в различных концентрациях, а также исследование спектров поглощения в среднем ИК-диапазоне. Актуальной задачей на сегодняшний момент остается исследование спектров поглощения меда в средней ИК-области, с целью определения сорта меда и содержания в нем фруктозы, глюкозы и сахарозы.

**Литература**

1. Заикина В.И. Экспертиза меда и способы обнаружения его фальсификации: Учебное пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд.-торг. корпорация «Дашков и К°», 2012. – 168 с.
2. ГОСТ 19792-2017. Мед натуральный. Технические условия. – Введен 01.01.2019. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.
3. Волоконно-оптический спектрометр Ocean Optics Модель USB4000. Руководство пользователя. – 137 с.
4. Бондарев С.А., Ромашкин П.С. Книга-помощник для начинающего пчеловода. – Ростов н/Д: Владис; М.: РИПОЛ классик, 2012. – 512 с.

УДК 543.4, 528.8, 681.785.554

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СРЕДЫ ZEMAX**

Алавяли А.Т.<sup>1</sup>, Савельев А.И.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н. Савельев А.И.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрено проектирование устройства дистанционного зондирования земли, определены предполагаемые отрасли использования данного устройства в случае его реализации. Проведен расчет оптических параметров устройства. Предложено использовать аддитивные технологии в разработке корпуса.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование земли, гиперспектральный анализ, Zemax.

**Введение.** Для обеспечения должного развития агропромышленных культур требуется тщательный мониторинг показателей их развития. К одному из способов такого мониторинга относится гиперспектральный анализ снимков, полученных с летательных аппаратов, в частности с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Один из первых методов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) – съемка изображений поверхности Земли с помощью искусственных спутников (ИС). С момента первого запуска ИС ДЗЗ (1972 г.) прошло 47 лет, достигнут значительный прогресс по качеству получаемых снимков, однако по-прежнему во многих системах пространственное разрешение в таких снимках не опускается ниже 5 м, что является большим недостатком при детальном анализе поверхности Земли [1]. Решением этой проблемы является аэрофотосъемка с использованием пилотируемых летательных аппаратов (ПЛА), которая была осуществлена раньше, чем был выведен на орбиту первый ИС с установленной на борту аппаратурой ДЗЗ. Аэрофотосъемка дает возможность получать более детальные снимки лучшего качества, но с экономической точки зрения использование ПЛА для регулярного мониторинга Земли, в том числе, например, для агропромышленного мониторинга является не рациональным. Встает вопрос о поиске высокоэффективного метода, позволяющего проводить ДЗЗ с наименьшими затратами и простотой эксплуатации. Съемка с помощью БПЛА удовлетворяет данным критериям. Этот метод позволяет регулярно отслеживать состояние почв и выращиваемых культур с минимальными затратами и с максимальной простотой использования.

**Модель.** В данной работе рассмотрен способ получения гиперспектральных снимков с помощью БПЛА и навесного оборудования – оптической системы регистрации электромагнитного излучения в видимом диапазоне, исполненного по схеме щелевого спектрометра с использованием дифракционной решетки (рис. 1) [2].

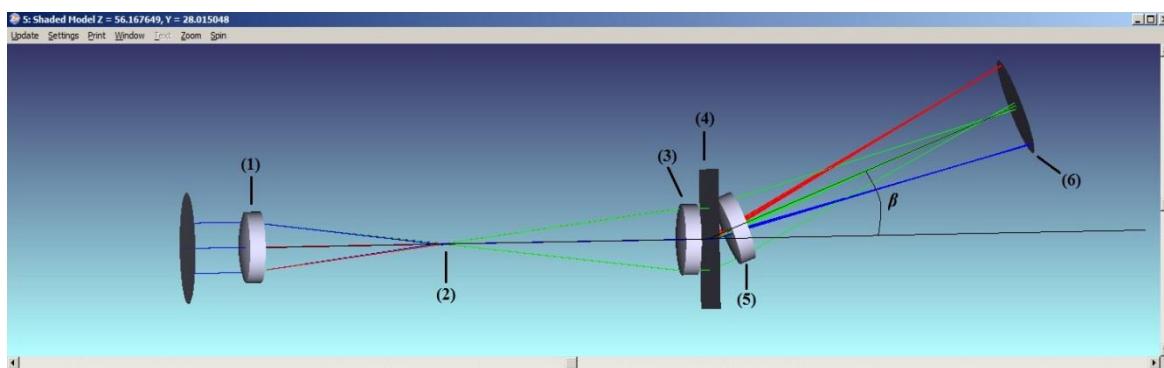


Рис. 1. Схема оптической системы

На рис. 1: 1 – фронтальная линза; 2 – прецизионная щель высотой  $a=25$  мкм, шириной  $b=3$  мм, расположенная в фокальной плоскости как коллиматорной линзы 3, так и фронтальной линзы; 4 – дифракционная решетка с шагом 600 штр/мм; 5 – детекторная линза, в фокальной плоскости которой расположен детектор 6. Угол наклона  $\beta$  выбирается исходя из рабочей длины волны  $\lambda$  из следующего выражения [3]:

$$d \sin(\beta) = m\lambda, \quad (1)$$

где  $m$  – порядок дифракции;  $d$  – постоянная решетки.

При выборе в качестве рабочей длины волны  $\lambda=600$  нм, получим, что угол, на которой должна быть наклонена оптическая ось сразу после дифракционной решетки, равняется  $\beta=21,1^\circ$ .

Данная система в комбинации с БПЛА осуществляет линейное сканирование поверхности Земли. Простота и гибкость конструкции позволяет использовать оптические элементы, выпускаемые серийно. В качестве оптических линз, моделируемых в данной работе, были выбраны линзы из каталога компании-дистрибутора оптоэлектронных компонентов ООО «Компания «АЗИМУТ ФОТОНИКС» (табл. 1) [4].

Таблица 1. Параметры узлов

Номер элемента / модель	$R1$ , мм	$R2$ , мм	$d$ , мм	$n_e$	Марка стекла
(1) / APLPXLC-127-R196-BK7	19,69	Inf	4,052	1,5187	K8
(3), (5) / APLPXLC-127-R259-BK7	25,94	Inf	3,789	1,5187	K8

Для моделирования системы используется программа оптического дизайна Zemax. Данное программное обеспечение (ПО) позволяет не только построить визуально модель, но и провести ее анализ, построить ход лучей, провести оптимизацию и т.д. [5].

**Анализ системы.** Поле зрения данной схемы в сагиттальной (2) и меридиональной (3) плоскости можно вычислить по размерам используемой щели по формулам:

$$\omega_x = b/f, \quad (2)$$

$$\omega_y = a/f, \quad (3)$$

где  $f$  – фокусное расстояние линзы (1).

Исходя из критерия Рэлея, согласно которому две спектральные линии с длинами волн  $\lambda$  и  $\Delta\lambda$  будут разрешены, если главный максимум для одной длины волны совпадает с первым дифракционным минимумом в том же порядке для другой длины волны (примем это расстояние за  $dl$ ), вычислим предел разрешения  $\Delta\lambda$ . Как видно из рис. 2,  $dl=21$  мкм, что дает возможность рассчитать величину  $\Delta\lambda$  для первого порядка по формуле:

$$\Delta\lambda = d(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1), \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  – угол дифракции  $\lambda$ ;  $\alpha_2$  – угол дифракции, соответствующий длине волны  $\lambda+\Delta\lambda$ ; находящейся на расстоянии  $dl$  от  $\lambda$  в плоскости детектора.

Важным параметром, характеризующим системы ДЗЗ, является пространственное разрешение, характеризуемое величиной *GIFOV* (Ground-projected Instantaneous Field of View), определяющей ширину проекции одного детекторного элемента на земную поверхность. В случае равностороннего пикселя, справедлива следующая формула [1]:

$$GIFOV = \frac{wH}{f}, \quad (5)$$

где  $w$  – ширина детекторного элемента;  $f$  – фокусное расстояние объектива;  $H$  – высота полета.

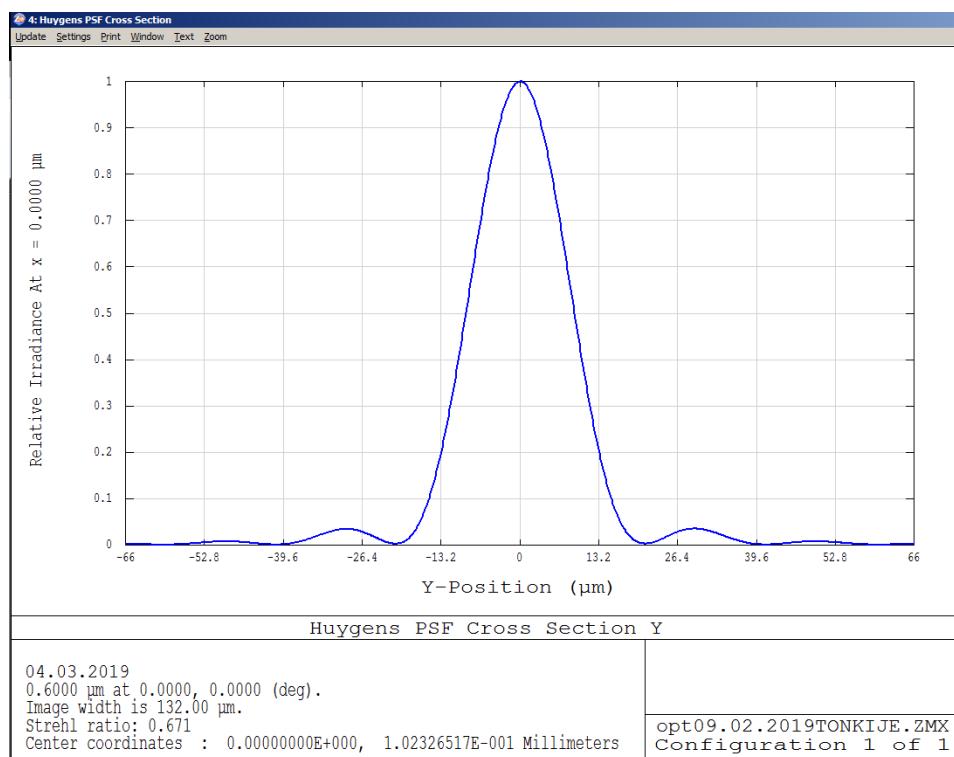


Рис. 2. Функция рассеяния точки

Спектральный диапазон ограничен наложением соседних порядков дифракционной решетки и хроматическими аберрациями. Для устранения первого ограничения можно воспользоваться оптическим фильтром, а для устранения второго ограничения можно заменить некоторые линзы дублетами по схеме крон-флинт, однако это существенно повысит в цене конечную стоимость устройства. В данной схеме спектральный диапазон лежит в пределах от 400 нм до 800 нм.

**Матрица.** При выборе детектора предпочтение отдается ПЗС-матрицам, в первую очередь потому, что они обладают наименьшим шумом по сравнению с КМОП-матрицами. Размеры требуемой матрицы можно установить экспериментальным путем, подставив в среде Zemax граничные условия по полям зрения и по ширине спектрального диапазона, что показано на рис. 3. В табл. 2 для расчета *GIFOV* была взята гипотетическая матрица с шириной пикселя  $w=10$  мкм.

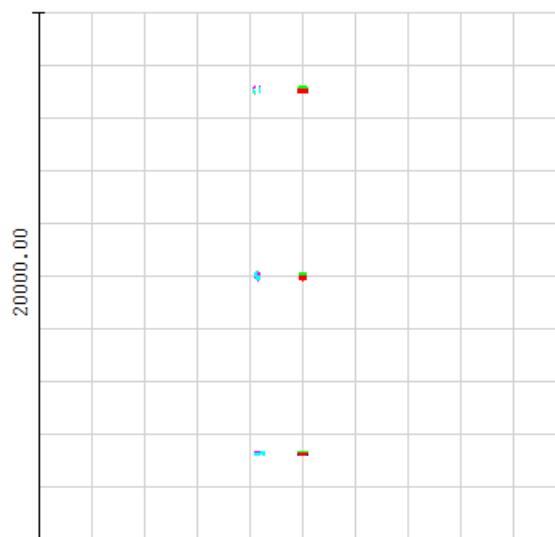


Рис. 3. Диаграмма пятна рассеяния по всему полю, одна ячейка имеет размеры 2×2 мм

Таблица 2. Рассчитанные характеристики системы гиперспектрального анализа

Параметр	Значение параметра
Рабочая длина волны $\lambda$	600 нм
Спектральный диапазон	400–800 нм
Постоянная решетки $d$	1666,67 нм
Поле зрения $2\omega_x$	4,521°
Поле зрения $2\omega_y$	0,0377°
Предел разрешения $\Delta\lambda$	0,64 нм
<i>GIFOV</i>	8,57 см

**Корпус.** Для построения корпуса предполагается использовать аддитивные технологии. 3D печать позволяет сократить расходы на производство по сравнению со стандартными способами, такими как штамповка и фрезерная резка. 3D печать позволяет использовать легкие пластмассы в конструкции прибора. Данное решение снизит его общий вес, что немаловажно для навесного оборудования БПЛА, так как полезная нагрузка на предполагаемых к использованию в данной работе БПЛА не превышает 500 г.

**Заключение.** В работе было проведено моделирование модуля ДЗЗ для БПЛА с использованием программного обеспечения Zemax. Вычислены характеристики данной системы, которые выведены в обобщающую табл. 2.

На основе предложенной модели планируется изготовление опытного образца и проведения полевых испытаний на соответствие рассчитанным характеристикам. По результатам будет решено, потребуются ли модернизации схемы, в том числе добавление фильтра, уменьшающего фактор наложения спектральных порядков.

### Литература

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 506 с.
2. Sigernes F. et al. Do it yourself hyperspectral imager for handheld to airborne operations // Optics express. – 2018. – V. 26. – № 5. – P. 6021–6035.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. пособие для вузов. – 6-е изд., стереотип. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
4. Азимут Фотоникс. Каталог продукции, плоско-выпуклые линзы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://azimp.ru/catalogue/lenses/42927/> (дата обращения: 28.02.2019).
5. Жуков С.В. Методические указания к лабораторным работам по «Оптическому материаловедению» и «Фотонике». – Самара: ПГУТИ, 2010. – 45 с.

УДК 681.7.068, 535.3

**ПОЛЫЕ АНТИРЕЗОНАНСНЫЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ  
СВЕТОВОДЫ ДЛЯ РАБОТЫ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ  
ОТ 1 ДО 2,5 МКМ**

**Ананьев В.А.<sup>1,2</sup>, Демидов В.В.<sup>2</sup>, Никоноров Н.В.<sup>1</sup>**

**Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Никоноров Н.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»

Приведены результаты исследований спектральных характеристик оптических потерь и модового состава излучения в антирезонансных микроструктурированных световодах с полой сердцевиной диаметром 50 мкм и оболочкой, выполненной на основе восьми соприкасающихся капилляров трапециевидной формы с толщиной стенки каждого капилляра 2,5 мкм на границе раздела «сердцевина-оболочка». Установлено, что в спектральном диапазоне от 1 до 2,5 мкм рассматриваемые световоды характеризуются тремя окнами прозрачности и практически одномодовым режимом передачи излучения с оптическими потерями фундаментальной моды, измеренными методом обрыва, в пределах от 10 до 33 дБ/м.

**Ключевые слова:** волоконный световод, полая сердцевина, одномодовый режим, фундаментальная мода, пропускание.

Современный этап развития волоконной оптики характеризуется интенсивными исследованиями в области создания стеклянных (преимущественно из кварцевого стекла) волоконных световодов для применения в технике специального назначения, в частности, легированных висмутом [1–5], радиационно-устойчивых [6–10], фоточувствительных [11–14], маломодовых [15–18], многосердцевинных [4, 15, 19], микроструктурированных [20–26], ориентированных как на расширение функциональных возможностей существующих устройств фотоники, лазерной физики и информационной техники, так и построение на их основе принципиально новых оптико-электронных приборов и комплексов.

В частности, световоды последнего из указанных типов, направляемые свойства которых достигаются образованием геометрически упорядоченного набора продольных пустот в стеклянной матрице, рассматриваются в качестве перспективных оптических элементов для передачи, преобразования и генерации световых потоков с заданными пространственно-временными характеристиками и открывают возможности создания класса новых оптических устройств для работы в ближней и средней инфракрасной областях спектра.

В настоящее время наибольшее внимание исследователей сосредоточено на разработке и всестороннем изучении микроструктурированных световодов с полой сердцевиной [4, 27–31], принцип локализации электромагнитного излучения в которых базируется на антирезонансном отражении света от стеклянных стенок вокруг сердцевины. Это обусловлено рядом преимуществ таких световодов относительно аналогов, сердцевина которых выполнена из стекла: возможность направленной передачи световых потоков с высокой мощностью от лазеров ультракоротких импульсов, возможность заполнения сердцевины газами с разным химическим составом, а также диэлектриками и полупроводниками, низкий коэффициент нелинейности и расширенный рабочий спектральный диапазон, не ограниченный пределом поглощения материала, из которого изготовлен световод. В ближайшие годы подобные оптические элементы найдут применение как в схемах новых лазерных источников среднего инфракрасного диапазона, так и в волоконно-оптических системах передачи и обработки информации и устройствах транспорта световых потоков с селективными пространственно-временными характеристиками.

Цель работы заключалась в экспериментально-теоретическом исследовании спектральных характеристик оптических потерь и модового состава излучения в

антирезонансных микроструктурированных световодах с полой сердцевиной большого диаметра и оболочкой из восьми соприкасающихся капилляров трапециевидной формы, обеспечивающих отрицательную кривизну границы раздела «сердцевина-оболочка».

Базируясь на имеющемся технологическом опыте получения кварцевых микроструктурированных световодов со стеклянной сердцевиной [23–26], авторами были разработаны технологические принципы изготовления световодов с полой сердцевиной. Для этого в трубе из кварцевого стекла ручным образом собиралась структура из восьми соприкасающихся капилляров с идентичными геометрическими параметрами. Капилляры фиксировались определенным образом на внутренней поверхности трубы для предотвращения нарушения их взаимного расположения. Таким образом, формировалась незаполненная стеклом область сердцевины в центральной части сборки. Затем сборка помещалась в печь на башне вытягивания волоконных световодов, в которой разогревалась до температуры около 1900°C и перетягивалась в полый световод с внешним диаметром 200 мкм. Сердцевина характеризовалась значением диаметра 50 мкм, а толщина стенки каждого капилляра на границе раздела «сердцевина-оболочка» – около 2,5 мкм. В процессе вытягивания осуществлялась подача избыточного давления в полости капилляров для предотвращения их схлопывания силами поверхностного натяжения. Изображение поперечного сечения, полученного световода приведено на рис. 1.

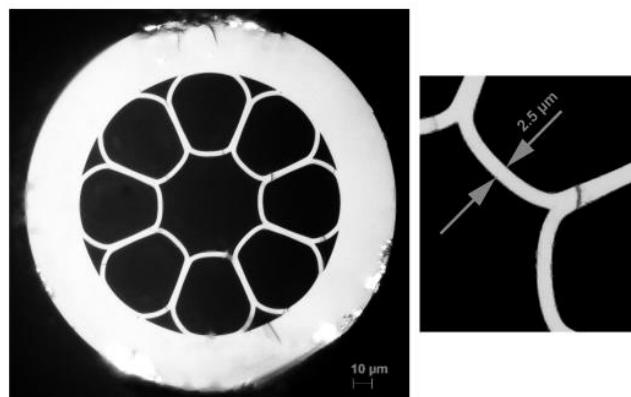


Рис. 1. Изображение поперечного сечения, полученного антирезонансного микроструктурированного световода с полой сердцевиной

Для исследования спектральных характеристик оптических потерь полученного световода была разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 2. В качестве источников излучения использовались источник суперконтирума с набором акустооптических перестраиваемых фильтров (для изучения оптических свойств на длинах волн 1,25 мкм и 1,65 мкм) и лазер на кристалле селенида цинка (для исследования оптических свойств на длине волны 2,25 мкм). Оптический сигнал на выходе световода регистрировался с помощью спектрометра и двух спектральных камер, охватывающих три указанные спектральные области. Для оценки оптических потерь использовались образцы световода длиной от 50 до 100 см.

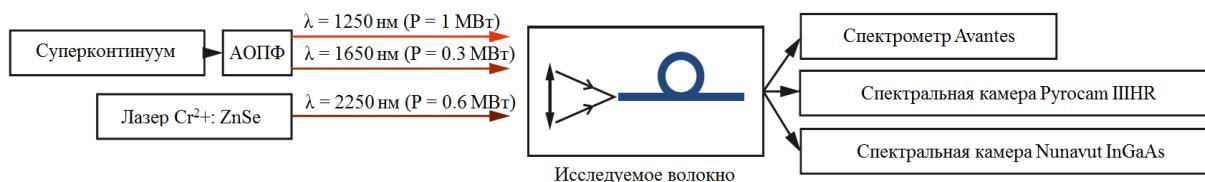


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования спектральных характеристик оптических потерь и модового состава излучения в полученном антирезонансном микроструктурированном световоде с полой сердцевиной

Как видно из представленных ниже рисунков, спектральная зависимость оптических потерь, рассчитанных с помощью метода конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics (рис. 3, а), и аналогичная зависимость уровня оптического сигнала, полученного экспериментально с использованием разработанной экспериментальной установки (рис. 3, б), для световода рассматриваемой конструкции однозначно свидетельствуют о наличии окон прозрачности вблизи длин волн 1,25, 1,65 и 2,2 мкм. Измеренные методом обрыва значения оптических потерь составили 14,9, 10,4 и 33 дБ/м на длинах волн 1,25, 1,65 и 2,25 мкм соответственно.

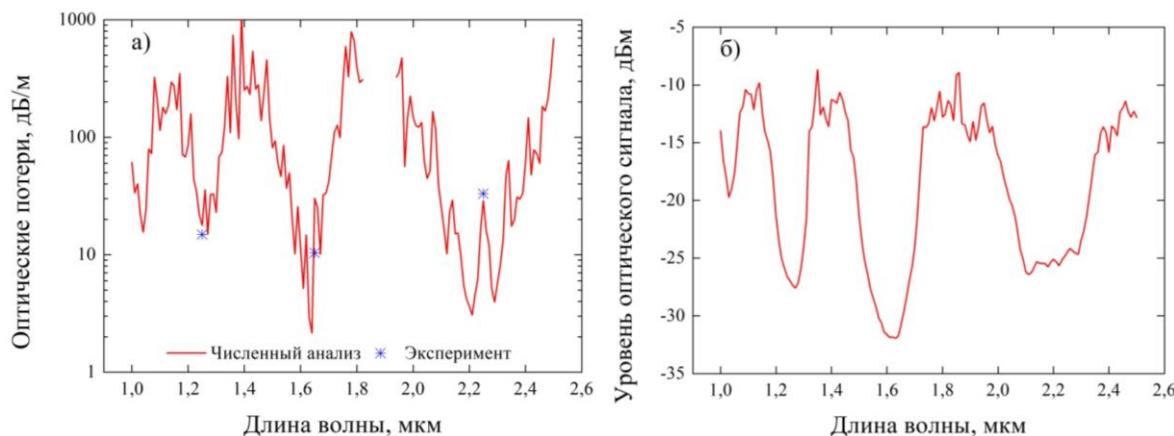


Рис. 3. Спектральные зависимости оптических потерь (а) и уровня оптического сигнала (б) в полученном антирезонансном микроструктурированном световоде

Результаты дополнительных исследований показали, что модовый состав световода представлен преимущественно фундаментальной модой с близким к гауссовому профилем интенсивности в каждом из трех окон прозрачности. Пример поперечного модового распределения на выходе световода для длины волны 1,25 мкм приведен на рис. 4. Характерный размер поля фундаментальной моды в дальней зоне, измеренный на расстоянии 10 мм от выходного торца световода, составил 37,5, 37,6 и 37,1 мкм на длинах волн 1,25, 1,65 и 2,25 мкм соответственно.

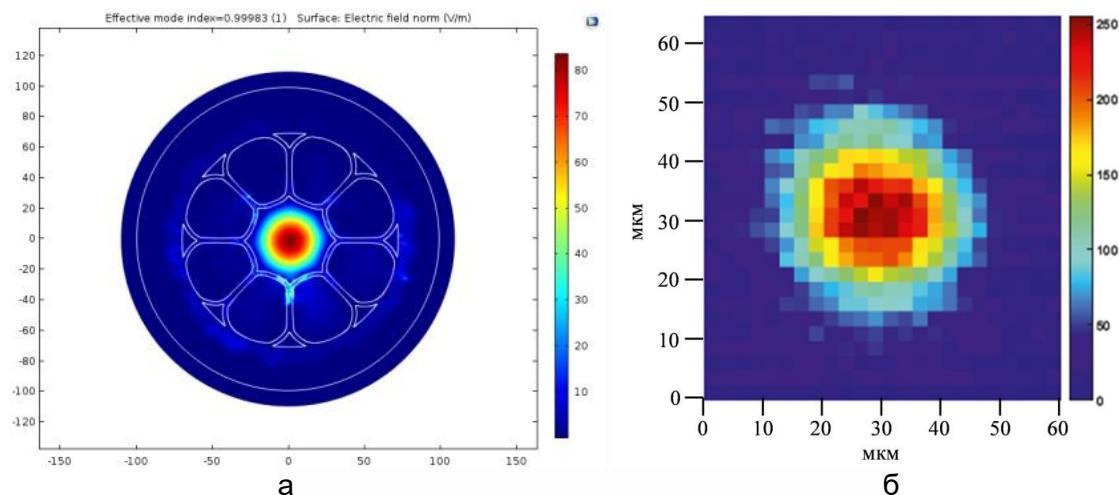


Рис. 4. Поперечное модовое распределение на выходе полученного антирезонансного микроструктурированного световода с полой сердцевиной на длине волны 1,25 мкм: рассчитанное в COMSOL Multiphysics (а); измеренное экспериментально (б)

Рассматриваемые оптические элементы могут найти применение для решения широкого круга метрологических, спектроскопических и лазерно-физических задач в ближней и средней инфракрасной областях спектра.

**Благодарность.** Авторы благодарят сотрудников НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана С.О. Леонова и Е.А. Елистратову за помощь в проведении экспериментальных исследований.

### Литература

1. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Bulatov L.I., Bufetov I.A., Shubin A.V., Melkumov M.A., Kustov E.F., Dianov E.M., Umnikov A.A., Khopin V.F., Yashkov M.V., Guryanov A.N. Bismuth-doped-glass optical fibers – a new active medium for lasers and amplifiers // Opt. Lett. – 2006. – V. 31. – № 20. – P. 2966–2968.
2. Dianov E.M. Bismuth-doped optical fibers: a challenging active medium for near-IR lasers and optical amplifiers // Light: Science & Applications. – 2012. – V. 1. – P. e12.
3. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Riumkin K.E., Shubin A.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. Bi-doped optical fibers and fiber lasers // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2014. – V. 20. – № 8. – P. 903815.
4. Dianov E.M., Semjonov S.L., Bufetov I.A. New generation of optical fibres // Quantum Electron. – 2016. – V. 46. – № 1. – P. 1–10.
5. Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Khegai A.M., Kharakhordin A.V., Melkumov M.A., Dianov E.M. Laser-active fibers doped with Bismuth for a wavelength region of 1.6–1.8  $\mu\text{m}$  // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2018. – V. 24. – № 5. – P. 0902415.
6. Girard S., Kuhnhenn J., Gusarov A., Brichard B., Van Uffelen M., Ouerdane Y., Boukenter A., Marcandella C. Radiation effects on silica-based optical fibers: recent advances and future challenges // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2013. – V. 60. – № 3. – P. 2015–2036.
7. Dukel'skii K.V., Eron'yan M.A., Komarov A.V., Khokhlov A.V., Kulesh A.Yu., Meshkovskii I.K., Lomasov V.N. Radiation-optical stability of single-mode W-type lightguides with depressed-index fluorosilicate cladding // J. Opt. Technol. – 2015. – V. 82. – № 2. – P. 113–115.
8. Kim Y., Ju S., Jeong S., Lee S.H., Han W.-T. Gamma-ray radiation response at 1550 nm of fluorine-doped radiation hard single-mode optical fiber // Opt. Express. – 2016. – V. 24. – № 4. – P. 3910–3920.
9. Girard S., Morana A., Ladaci A., Robin T., Mescia L., Bonnefois J.-J., Boutillier M., Mekki J., Paveau A., Cadier B., Marin E., Ouerdane Y., Boukenter A. Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications // J. Opt. – 2018. – V. 20. – № 9. – P. 093001.
10. Tomashuk A.L., Filippov A.V., Kashaykin P.F., Bychkova E.A., Galanova S.V., Tatsenko O.M., Kuzyakina N.S., Zverev O.V., Salgansky M.Y., Abramov A.N., Guryanov A.N., Dianov E.M. Role of inherent radiation-induced self-trapped holes in pulsed-radiation effect on pure-silica-core optical fibers // J. Lightwave Technol. – 2019. – V. 37. – № 3. – P. 956–963.
11. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments // Sensors. – 2012. – V. 12. – № 2. – P. 1898–1918.
12. Varzhel' S.V., Mun'ko A.S., Konnov K.A., Gribaev A.I., Kulikov A.V. Recording Bragg gratings in hydrogenated birefringent optical fiber with elliptical stress cladding // J. Opt. Technol. – 2016. – V. 83. – № 10. – P. 638–641.
13. Arkhipov S.V., Strigalev V.E., Soldatova N.S., Varzhel' S.V., Mun'ko A.S., Smirnova Yu.D. How the efficiency with which Bragg gratings are recorded in birefringent optical fibers depends on the orientation of elliptical stress cladding // J. Opt. Technol. – 2016. – V. 83. – № 11. – P. 708–710.

14. Eron'yan M.A., Ter-Nersesyants E.V., Komarov A.V., Bezborodkin P.V., Meshkovskii I.K., Varzhel' S.V., Tsibinogina M.K., Shcheglov A.A. Photorefractivity of germanosilicate light guides // *J. Opt. Technol.* – 2017. – V. 84. – № 10. – P. 698–700.
15. Richardson D.J. New optical fibres for high-capacity optical communications // *Phil. Trans. R. Soc. A.* – 2016. – V. 374. – № 2062. – P. 20140441.
16. Бурдин А.В., Морозов О.Г., Васильтев А.А., Кафарова А.М., Минаева А.Ю., Севрук Н.Л. Экспериментальная апробация квази-интерферометрической схемы регистрации внешних механических воздействий на основе анализа отклика маломодового оптического сигнала // Труды учебных заведений связи. – 2017. – V. 3. – № 2. – С. 37–50.
17. Andreev V.A., Bourdine A.V., Burdin V.A., Evtushenko A.S., Halikov R.H. Design of low DMD few-mode optical fibers with extremely enlarged core diameter providing nonlinearity suppression for operating over «C»-band central region // *Proc. SPIE.* – 2017. – V. 10342. – P. 1034207.
18. Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А. Исследование влияния отклонения геометрии промышленных образцов маломодовых оптических волокон от оптимальной формы на деградацию спектральной характеристики дифференциальной модовой задержки // Труды учебных заведений связи. – 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 18–25.
19. Saitoh K., Matsuo S. Multicore fiber technology // *J. Lightwave Technol.* – 2016. – V. 34. – № 1. – P. 55–66.
20. Russell P.St.J. Photonic-crystal fibers // *J. Lightwave Technol.* – 2006. – V. 24. – № 12. – P. 4729–4749.
21. Arismar Cerqueira S.Jr. Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers // *Rep. Prog. Phys.* – 2010. – V. 73. – № 2. – P. 024401.
22. Jin W., Ju J., Ho H.L., Hoo Y.L., Zhang A. Photonic crystal fibers, devices, and applications // *Front. Optoelectron.* – 2013. – V. 6. – № 1. – P. 3–24.
23. Demidov V.V. Single-mode microstructured lightguides with circular placement of cavities for radiation transport in the limited-nonlinearity regime // *J. Opt. Technol.* – 2017. – V. 84. – № 8. – P. 504–508.
24. Гатчин Ю.А., Демидов В.В., Дукельский К.В., Тер-Нерсесянц Е.В. Квазиодномодовые световоды с увеличенным размером сердцевины на основе микроструктур негексагонального типа // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 37–42.
25. Гатчин Ю.А., Демидов В.В., Дукельский К.В., Злобин П.А., Матросова А.С. Технологические основы получения механически стабильных одномодовых микроструктурированных световодов с предельно низким затуханием сигнала // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 29–35.
26. Демидов В.В., Дукельский К.В., Леонов С.О., Матросова А.С. Нелинейно-оптические преобразования пикосекундных лазерных импульсов в многомодовых микроструктурированных световодах с умеренной нелинейностью // Труды учебных заведений связи. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 61–66.
27. Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Kosolapov A.F., Plotnichenko V.G., Semjonov S.L., Dianov E.M. Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow-core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectra region  $>3.5 \mu\text{m}$  // *Opt. Express.* – 2011. – V. 19. – № 2. – P. 1441–1448.
28. Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region // *Opt. Express.* – 2013. – V. 21. – № 8. – P. 9514–9519.
29. Poletti F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber // *Opt. Express.* – 2014. – V. 22. – № 20. – P. 23807–23828.

30. Alagashev G.K., Pryamikov A.D., Kosolapov A.F., Kolyadin A.N., Lukovkin A.Yu., Biriukov A.S. Impact of geometrical parameters on the optical properties of negative curvature hollow-core fibers // *Laser Phys.* – 2015. – V. 25. – № 5. – P. 055101.
31. Frosz M.H., Roth P., Gunendi M.C., Russell P.St.J. Analytical formulation for the bend loss in single-ring hollow-core photonic crystal fibers // *Photon. Research.* – 2017. – V. 5. – № 2. – P. 88–91.

УДК 543.544.19

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СЕЛЕКТИВНОГО  
ФОТОВОЗБУЖДЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО  
РАЗДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ КРАСИТЕЛЕЙ**

Анчуткин Г.Г.<sup>1</sup>, Плясцов С.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.т.н., профессор Мешковский И.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе экспериментально исследовано влияние селективного фотовозбуждения на процесс хроматографического разделения молекул красителей родамина 6Ж и оксазина через хроматографическую колонку, заполненную силикагелем. Показано, что при лазерном облучении колонки происходит замедление одного компонента смеси – родамина 6Ж. Получены экспериментальные данные о зависимости скорости потока красителей через колонку от плотности мощности лазерного облучения. Экспериментальные данные качественно согласуются с теоретической моделью разделения веществ методом фотонной хроматографии.

**Ключевые слова:** хроматография, родамин 6Ж, красители, возбужденное состояние вещества, лазерное облучение.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 14.587.21.0043 от 03.10.2017 г. RFMEFI58717X0043).

**Введение.** Хроматографическое разделение молекул и ионов широко используются для количественного анализа смесей и растворов веществ, например, в химическом анализе, в фармацевтических и биологических областях науки и техники [1]. Основными тенденциями развития хроматографических методов является применение компактных хроматографических установок, а также использование различных механизмов адсорбции [2]. Предложен новый хроматографический метод, основанный на селективном возбуждении веществ оптическим излучением [3]. В основе метода идея использования различных адсорбционных свойств основных и возбужденных состояний веществ.

В работе [3] представлена модель, описывающая снижение скорости электродиффузии молекул родамина 6Ж, возбужденных лазерным излучением при прохождении через пористую среду. Эффект был продемонстрирован для случая использования пористого стекла в качестве неподвижной хроматографической фазы. С целью использования стандартных средств в установке для хроматографического разделения веществ предлагается исследовать подвижность молекул красителей в возбужденном состоянии при движении последних через классическую хроматографическую колонку, заполненную силикагелем. Использование классической хроматографической колонки существенно упрощает процесс разделения веществ, так как силикагель имеет заданную пористую структуру, что предотвращает трудоемкий и затяжной процесс образования пор методом выщелачивания (при приготовлении пористого стекла).

Целью данной работы было экспериментально продемонстрировать возможность разделения молекул органических красителей методом фотонной хроматографии при использовании классической хроматографической колонки в качестве неподвижной фазы и сравнить полученные результаты с моделью, предложенной в [3].

**Методика.** Для исследований метода фотонной хроматографии с использованием классической хроматографической колонки была разработана экспериментальная установка, рис. 1. Колонка состоит из стеклянной трубы высотой 20 см и внутренним

диаметром 8 мм, с плоским дном, в нижней части, которой имеется носик с отверстием с внутренним диаметром 0,1 мм для выхода элюента. Колонка заполнялась силикагелем Davisil 633 Sigma-Aldrich, с размером частиц от 35 до 75 мкм 0,6 г, высота получившейся колонки 0,7 см. В качестве подвижной фазы выбран этиленгликоль, с близким к стеклу коэффициентом преломления для достижения иммерсии. Перед каждым экспериментом силикагель выдерживается в этиленгликоле в течение двух суток. Колонка освещалась с торца по всей длине, лазерный пучок был расширен с помощью системы линз. Использовался DPSS лазер, (ООО «ФТИ-Оптроник») с длиной волны излучения 532 нм, максимальной мощностью 1,5 Вт и диаметром пучка 3 мм<sup>2</sup>. Лазер был установлен на трех-осевую подвижку для юстировки направления пучка.

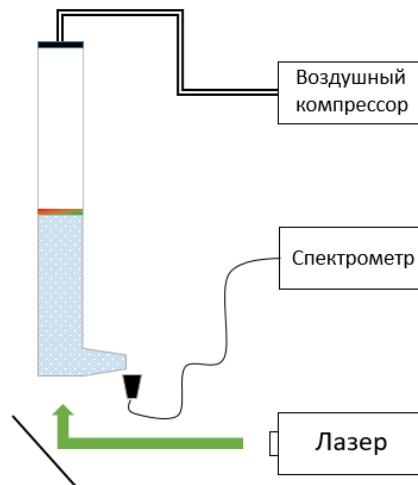


Рис. 1. Экспериментальная установка фотонного хроматографа

На рис. 2 представлен спектр поглощения смеси выбранных молекул красителей: родамина 6Ж и оксазина 1 перхлорат. Разделяемая смесь выбрана таким образом, чтобы селективно возбудить молекулы родамина 6Ж. Предполагается что, молекулы родамина 6Ж, поглощая лазерное излучение, будут активно взаимодействовать с поверхностью неподвижной фазы [4], что замедляет его перемещение по колонке и позволяет отделить от другого компонента смеси, находящего в невозбужденном состоянии – оксазина. Для обоих красителей наблюдается флуоресценция, что позволяет с высокой точностью производить их детектирование на спектрофлуориметре.

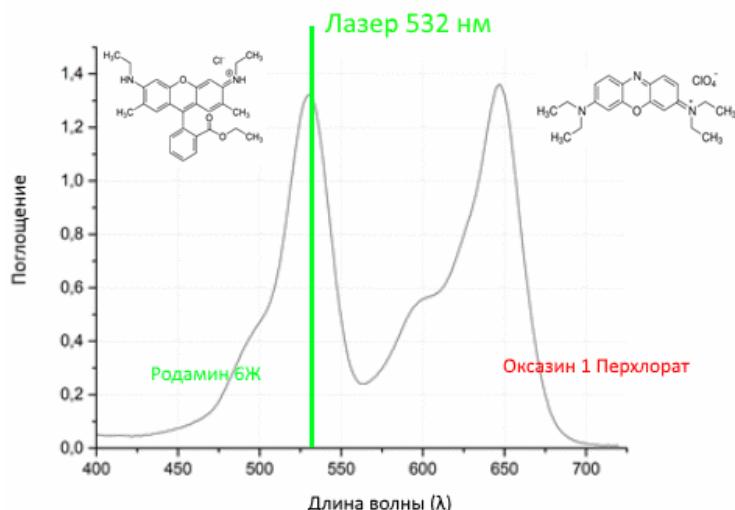


Рис. 2. Спектр поглощения смеси красителей: родамин 6Ж и оксазин 1 перхлорат. Происходит селективное возбуждение родамина лазером 532 нм

После упаковки колонки в верхнюю ее часть наносится смесь разделяемых веществ – выбранных молекул красителей – родамина 6Ж и оксазина 1 перхлорат. С помощью микродозатора (Plastomed) в колонку с шприца впрыскивалось 50 мкл этанольного раствора красителей с концентрацией  $10^{-5}$  моль/л и выдерживается около 10 мин до впитывания смеси верхним слоем силикагеля. Сверху колонка присыпается небольшим слоем песка. Движение анализов осуществлялось засчет давления, которое создавалось компрессором (Bambi Air Compressor Ltd). Давление 3,5 бар обеспечивало скорость потока через колонку 11 мл/ч.

После хроматографической колонки происходит сбор подвижной фазы. Каждые 1,5 мл собирается в кювету для измерения величины сигнала флуоресценции красителей на спектрофлуориметре (Флюорат 02-Панорама).

**Результаты экспериментов и сравнение с моделью.** Проведены экспериментальные исследования влияния излучения лазера с длиной волны 532 нм, плотностью мощности излучения до 11 Вт/см<sup>2</sup>, на прохождение раствора родамина 6Ж и оксазина через колонку, заполненную силикагелем. На рис. 3 представлены кривые изменения интенсивности флуоресценции родамина 6Ж и оксазина в подвижной фазе после выхода из хроматографической колонки в экспериментах с облучением лазером и без него. Чтобы показать зависимость между скоростью движения молекул красителей через колонку и интенсивностью лазерного излучения, проведены эксперименты с различной мощностью лазерного облучения: 500 мВт и 1100 мВт. В случае облучения лазером на хроматограмме наблюдается, что пик, соответствующий родамину 6Ж смещается правее во времени с увеличением интенсивности лазерного излучения (для мощности облучения 1100 мВт сдвиг пика на 60 мин). При этом скорость движения оксазина по хроматографической колонке остается неизменной.

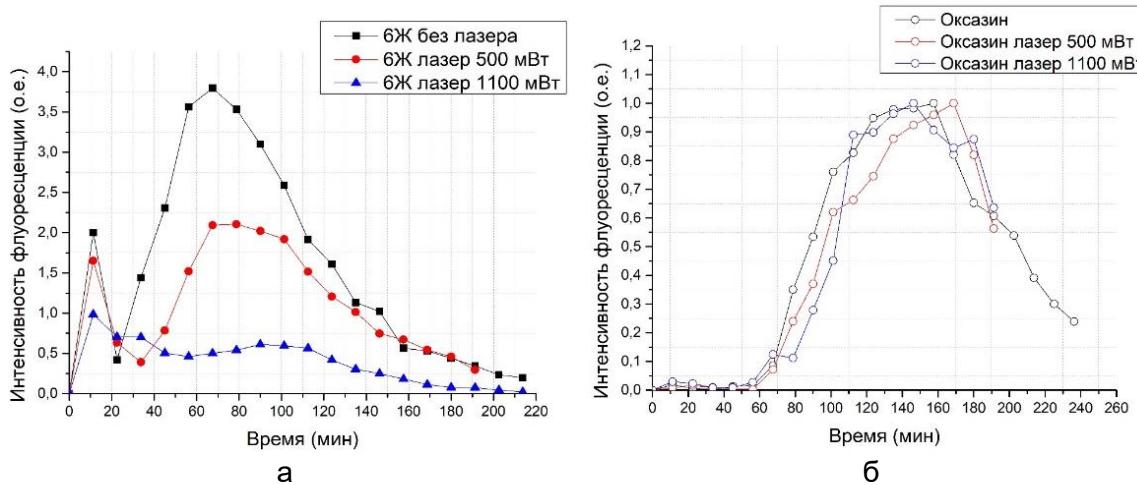


Рис. 3. Движение родамина 6Ж (а) и оксазина 1 перхлорат (б) через хроматографическую колонку в трех экспериментах: без лазерного облучения, с облучением 500 мВт и 1100 мВт. Происходит сдвиг пика родамина правее во времени с увеличением интенсивности лазерного облучения

Уменьшение величины интенсивности пика родамина 6Ж при движении по хроматографической колонке при ее облучении связано, вероятно, связано с фотораспадом красителя. Нами был проведен эксперимент, целью которого было оценить скорость фотораспада молекул родамина 6Ж в растворе этанола под воздействием лазерного излучения различной мощности, рис. 4. Раствор смеси красителей родамина 6Ж и оксазина, набирался в кювету, которая подвергалась лазерному облучению. Через равные промежутки времени измерялась интенсивность флуоресценции красителей. Для родамина 6Ж наблюдается линейное уменьшение

интенсивности флуоресценции. При большей интенсивности лазерного излучения скорость фотораспада увеличивается. Для оксазина существенного изменения интенсивности флуоресценции не наблюдается.

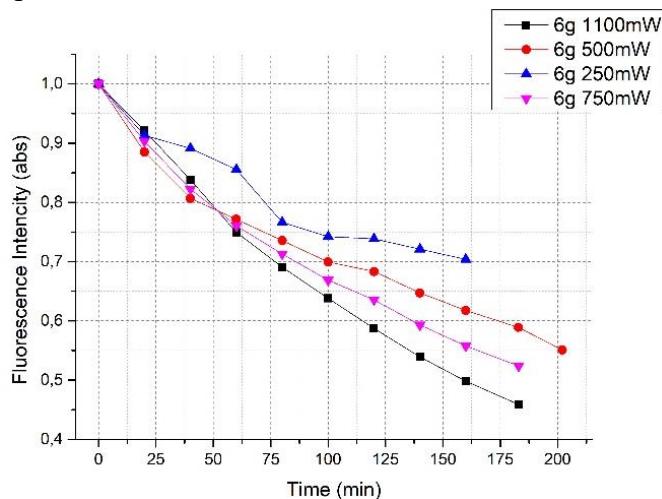


Рис.4. Скорость фотораспада молекул родамина 6Ж в этаноле при облучении лазером с различной интенсивностью

Появление первого пика на хроматограмме движения родамина 6Ж по колонке на первом измерении, скорее всего, связано с движением красителя по свободному объему. С целью изучения количества молекул красителей, двигающихся по колонке в свободном объеме, был проведен эксперимент по изучению степени адсорбции силикагелем молекул красителей родамина 6Ж и оксазина, рис. 5. В 2 мл смеси родамина 6Ж и оксазина концентрации  $10^{-6}$ М добавлено 0,5 г силикагеля АСКГ. Через 2 ч снят спектр флуоресценции раствора красителей. Показано, что 26% молекул родамина и 10% молекул оксазина осталось в свободном объеме.

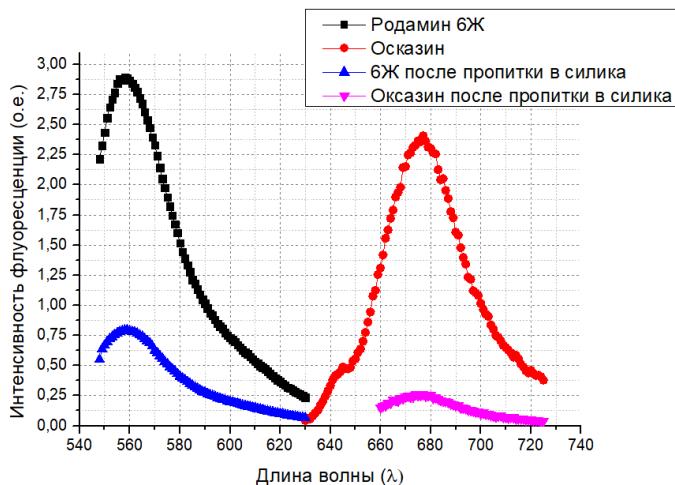


Рис. 5. Степень адсорбции силикагелем Davisil 633 молекул красителей родамина 6Ж и оксазина. После пропитки раствора с красителями в силикагеле 26% молекул родамина 6Ж остается в растворе

На основании экспериментальных данных по движению родамина по хроматографической колонке для различных значений мощности лазерного облучения, построены кривые зависимости плотности мощности излучения от скорости потока родамина 6Ж, рис. 6. Для измерения скорости потока родамина 6Ж значения интенсивности на хроматограмме калибровались на величину фотораспада красителя и степень адсорбции молекул красителей силикагелем. Также представлена модель скорости диффузии родамина 6Ж, представленная в работе [3]. Наблюдается снижение

скорости потока родамина 6Ж через колонку с увеличением мощности лазерного облучения. Отличие скорости потока от теоретической кривой в 2 раза объясняется использованием силикагеля вместо пористого стекла в качестве неподвижной фазы.

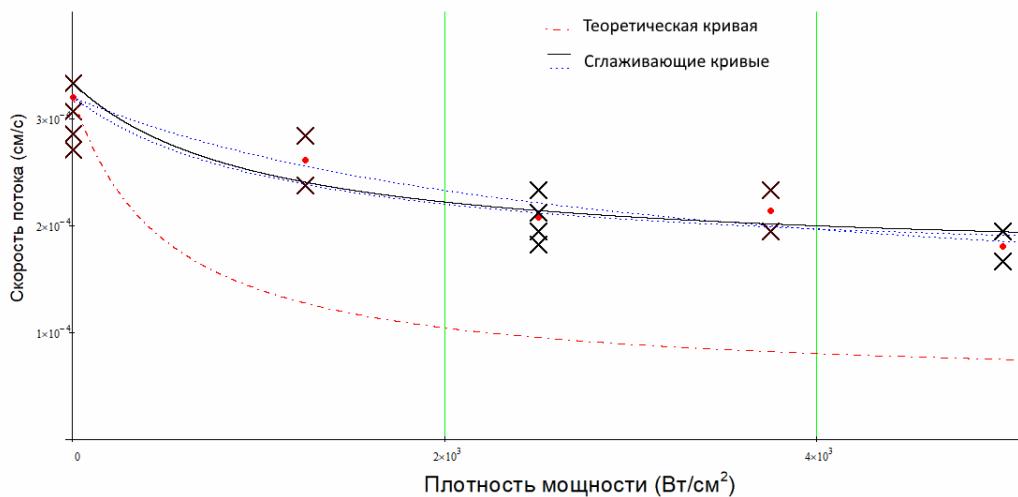


Рис. 6. Зависимость скорости потока родамина 6Ж от плотности мощности лазерного облучения. Представлены экспериментальные данные, теоретическая кривая, сглаживающие кривые

**Заключение.** В ходе работы была разработана и создана экспериментальная установка для исследования влияния селективного возбуждения на движение молекул красителей через классическую хроматографическую колонку с использованием силикагеля в качестве неподвижной хроматографической фазы. Для смеси родамина 6Ж и оксазина 1 перхлорат показано, что при облучении хроматографической колонки лазером на длине волны мощностью 1100 мВт, происходит замедление движения по колонке компонента смеси родамина 6Ж. В случае лазерного облучения происходит сдвиг пика, соответствующего Родамину 6Ж, на 60 мин. Измерена зависимость скорости потока родамина 6Ж от плотности мощности лазерного облучения.

Преимуществами разработанной установки на основе хроматографической колонки являются возможность использования различных марок силикагеля с различным размером частиц. Также колонка не требует специальной системы сбора разделенных компонентов: после процесса разделения и прохождения хроматографической колонки происходит сбор жидкой подвижной фазы с необходимым компонентом смеси.

### Литература

1. Беккер Ю. Хроматография. Инструментальная аналитика: методы хроматографии и капиллярного электрофореза. – М.: Техносфера, 2009. – 473 с.
2. Fanali S., Haddad P.R., Poole C., Lloyd D.K. Liquid Chromatography. – Elsevier, 2013. – 683 p.
3. Meshkovsky I.K., Miroshnichenko G.P. Electrodiffusion of molecules in porous glass under the action of laser excitation // J. Opt. Soc. Am. B. – 2018. – V. 35. – № 11. – P. 2859–2863.
4. Мешковский И.К. Композиционные оптические материалы на основе пористых матриц. Монография. – СПб., 1998. – 332 с.

УДК 535.212

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛАЗЕРОИНДУЦИРОВАННЫХ  
РАЗРУШЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ ФРАКТАЛЬНОГО  
АНАЛИЗА**

Ахмадуллин Р.М.<sup>1</sup>, Сергеев А.Н.<sup>1</sup>, Ходосова Е.Д.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Беликов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

Представлены результаты работы по исследованию характерных значений фрактальной размерности контуров лазероиндужированных разрушений (ЛИР) оптических элементов. Рассмотренный способ количественного анализа изображений ЛИР, полученных при регистрации на ПЗС матрицу, основан на измерении длины контура разрушения (методом Канни) с последующим расчетом фрактальной размерности (методом Минковского). Исследовались изображения, полученные в ходе экспериментов по определению лучевой прочности кварцевых оптических элементов. Определены численные значения фрактальной размерности и обосновано применение метода фрактального анализа при автоматизации исследования оптических элементов на лучевую прочность методом ЛИР. Разработан алгоритм обработки цифровых изображений методом Канни с последующим подсчетом фрактальной размерности в математической программной среде MATLAB.

**Ключевые слова:** фрактальный анализ, лазероиндужированные разрушения, морфология разрушений оптических элементов, детектор Канни, метод Минковского.

В настоящее время происходит интеграция в различные сферы науки методов компьютерного анализа данных для достижения высокой точности обработки результатов экспериментов и диагностики. В сфере лазерной техники существует потребность определения лучевой прочности оптических элементов, для их корректного применения. Имеются различные методики, в основе которых лежит накопление статистических данных лазероиндужированного разрушения (ЛИР) образца при помощи ряда значений плотности мощности/энергии лазерного излучения [1–5]. На рис. 1 приведена схема установки и алгоритм построения кривой вероятности разрушения от плотности мощности лазерного разрушения.

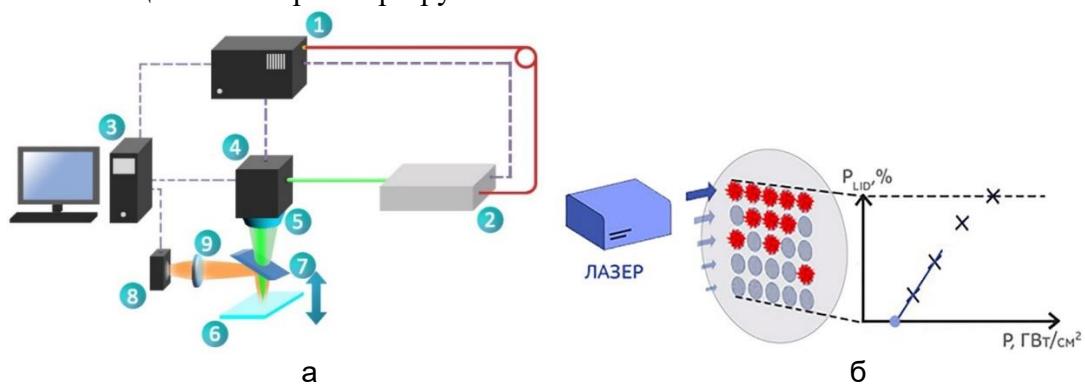


Рис. 1. Схема установки (а) для определения порога ЛИР оптического элемента и алгоритм построения (б) кривой вероятности разрушения (1 – блок питания лазерного диодного модуля; 2 – лазерный излучатель; 3 – ПК с установленным ПО; 4 – система углового сканирования F-theta линза; 5 – исследуемый объект; 6 – дихроичное зеркало; 7 – камера; 8 – объектив) [5]

В результате измерений по данным методикам получается изображение, снятое с помощью оптоэлектронного устройства, на котором зарегистрирована область оптического элемента с рядом ЛИР, пример изображений приведен на рис. 2.

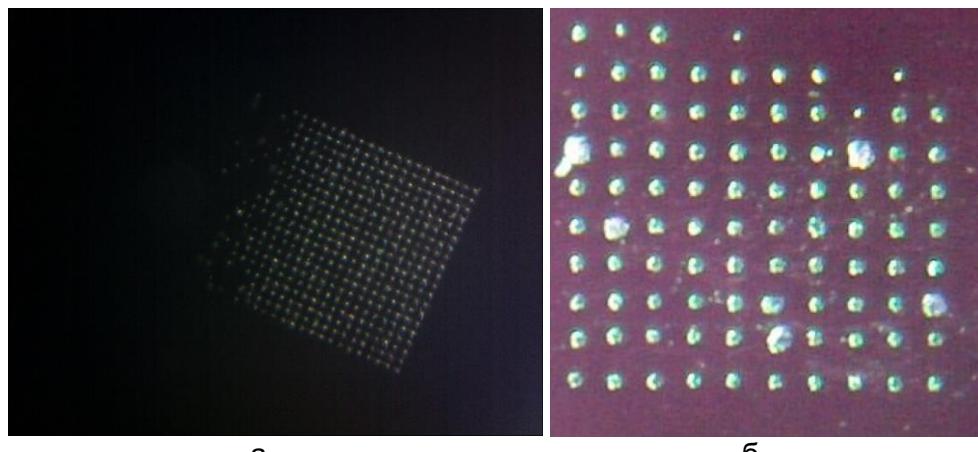


Рис. 2. Фотографии полей сканирования, полученные при измерении порога разрушения под воздействием лазерного излучения на стекле БК7 и кварцевом стекле

Обычно производится «ручной» подсчет разрушений для каждой строки, с последующим построением графика зависимости проиллюстрированного на рис. 1. Однако для автоматизации обработки данных и увеличения точности результатов, необходима интеграция новых подходов из сферы компьютерного зрения. Существует метод, основанный на подсчете количества пикселей, значения которых не равны нулю [6]. Однако в приведенной работе не учитывается возможность появляется при регистрации изображения при помощи камеры, таких явлений как блики, рассеяние света на частичках разрушенного материала, пыли, что ведет к неправильному детектированию наличия или отсутствия разрушения и как следствия погрешностям в графике зависимости вероятности разрушения от плотности мощности лазерного излучения. Других работ, предлагающих автоматизировать данный этап работы, не было обнаружено.

В рамках данной работы, авторами предложено анализировать разрушения при помощи инструментов компьютерного зрения. Для этого был выбран детектор границ Канни, позволяющий детектировать контуры между областями с высоким контрастом [7]. Его алгоритм состоит из нескольких этапов. Первое действие алгоритма – это сглаживание изображения. Этот шаг нужен для того, чтобы уменьшить дисперсию шума на изображении. Следующий шаг состоит в определении градиентов изменения яркости. Далее происходит пороговая обработка результатов вычисления градиентов. В процессе подавляются скачки яркости на изображении. Таким образом, программа сохраняет только те значения вычисленных градиентов, которые превышают значения градиентов в двух соседних точках на изображении по направлению градиента. В итоге сохраняются значения только в точках с максимальным изменением яркости на границе. Завершающий шаг алгоритма – это обработка результатов. В процессе обработки необходимо задать два порога: верхний и нижний. При формировании контура все точки, превысившие верхний порог, будут сохранены. Что касается точек, превысивших нижний порог, то тут немного сложнее. Из них будут сохранены лишь те, которые непосредственно соседствуют с точками, превысившими верхний порог. Остальные точки и вовсе исключаются из итогового изображения. Метод Канни базируется на трех основных критериях: хорошее обнаружение (повышение отношения сигнал/шум); правильное определение положения границы и единственный отклик на одну границу. Пример выделения контуров на изображении приведен на рис. 3.

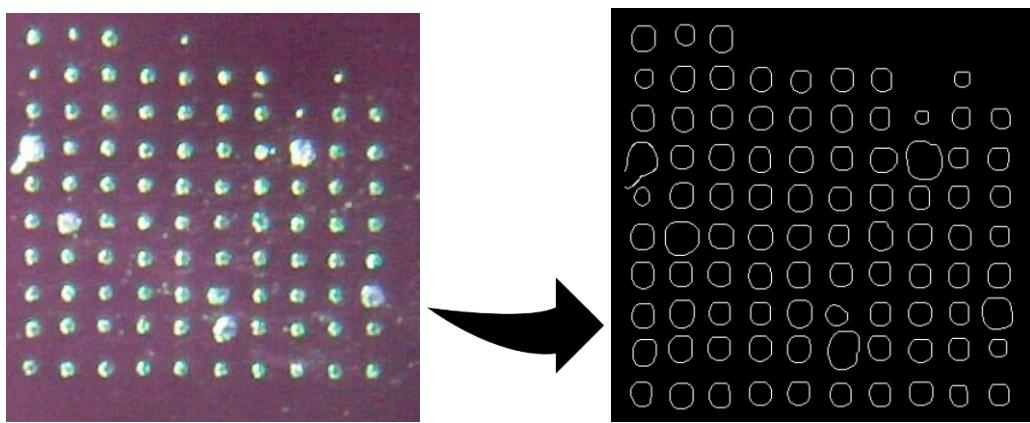


Рис. 3. Результат детектирования границ оператором Канни на изображении с массивом ЛИР разрушений на поверхности оптического элемента

В настоящее время имеется возможность построить график зависимости вероятности разрушения от плотности мощности лазерного излучения, опираясь на количество контуров в ряде. Расчетным параметром может служить длина полученного контура, т.е. контур, чья длина больше заданной, будет являться контуром разрушения, соответственно в данной области присутствует разрушение. Однако в данном случае имеется зависимость от размера исходного разрушения. При большом разрешении изображения, область лазерного индуцированное разрушения можно описать большим количеством пикселей, чем при изображении с меньшим разрешением, что означает отсутствие автоматизации на этапе подбора длины контура. Поэтому авторами настоящей работы предлагается детектировать разрушения при помощи фрактального анализа.

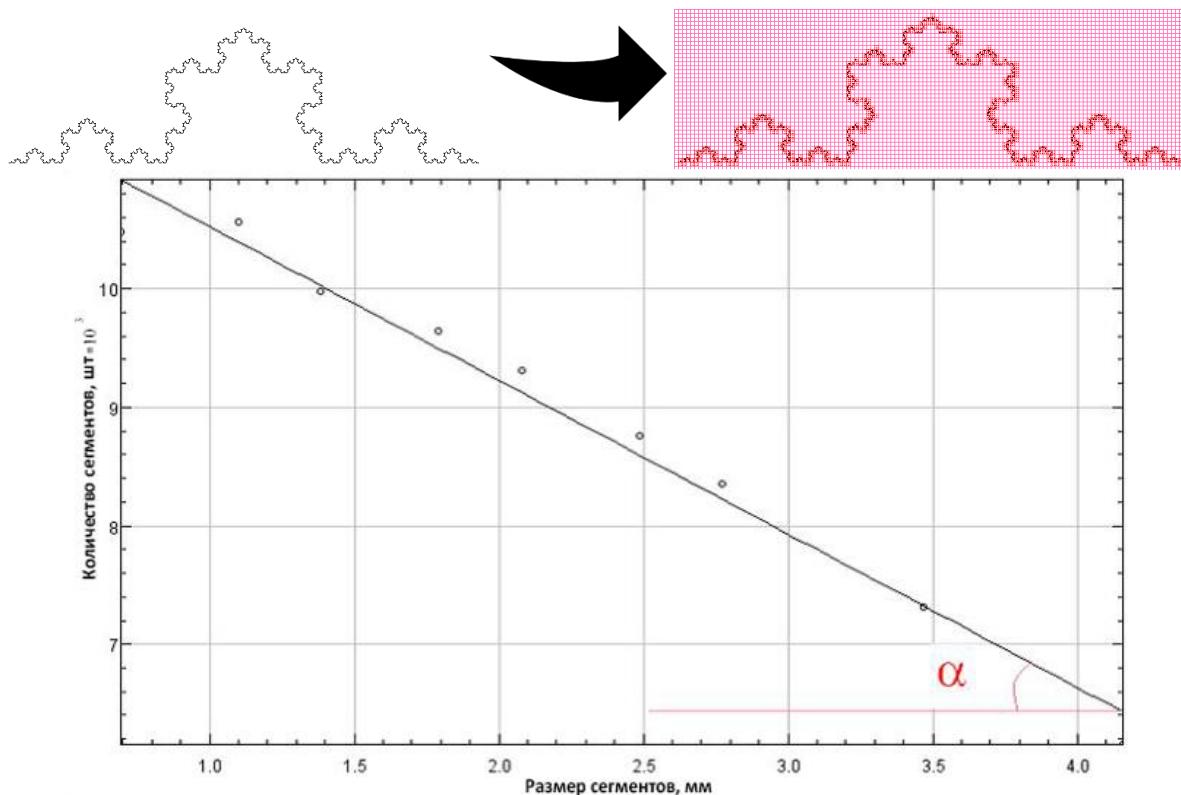


Рис. 4. Алгоритм работы метода Минковского, в ПО MATLAB toolbox называется boxcounting

Для исходных данных необходимо изображение с полученными контурами (рис. 3) обнаруженными оператором Канни. При помощи метода Минковского рассчитываем фрактальную размерность полученного контура разрушения. Метод Минковского заключается в том, что изображение разбивается на большое количество секторов, которые в свою очередь уменьшаются до тех пор, пока не достигнут минимальный размер квадрата. Далее строится график зависимости размера секторов от их количества в изображении. Коэффициент наклона прямой рассчитанный по формуле, при помощи которой аппроксимируются данные значения, является фрактальной размерностью.

$$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(\varepsilon)}. \quad (1)$$

Исходное изображение (рис. 4) разбивается на сектора и при последующем многочисленном разбиении на сектора (элементы) разных размеров получается результат, показанный на графике зависимости размера элемента от их количества. После аппроксимирования данных прямой линией, можно вычислить коэффициент наклона, что и будет являться фрактальной размерностью изображения  $D$ .

Фрактальная размерность для контуров, лежащих на двумерном изображении, будет лежать в пределах от единицы до двух. Данный параметр не зависит от длины полученного контура, он базируется на сегментированной структуре контура.

Данный факт позволяет считать данное значение  $D$  идентификатором наличия или отсутствия разрушения. На рис. 5 приведен пример детектирования контуров разрушений (изображения разрушений получены из [8]) с последующим определением фрактальной размерности контуров. Алгоритм реализован в ПО MATLAB. Выявление пробоя в заданной точке считается действительным, если фрактальная размерность отлична от 1. Контуры пробоя выявляются последовательной работы бинаризации изображения и детектора границ Канни. Как отмечалось ранее данный подход позволяет обрабатывать изображения сканов любых размеров.

Анализируемое изображение		Фрактальная размерность	
			$D=NaN$ (отсутствует)
			$D=1,11$
			$D=1,24$

Рис. 5. Результат детектирования границ оператором Канни на изображении с трещиноватым (хрупким) разрушением и дефектов в виде оплавления

Помимо возможности однозначного определения наличия или отсутствия ЛИР, замечен дополнительный любопытный факт, который до этого не был описан в источниках литературы. Было проведено накопление статистики анализа морфологии разрушений на образце кварцевого стекла, определены характерные значения фрактальной размерности разных типов разрушения. Для «оплавления» среднее значение составило –  $1,22 \pm 0,03$ , для трещиноватого разрушения среднее значение составило –  $1,12 \pm 0,03$ , что позволяет различать их при анализе. Как известно при механизме несобственного разрушения [4], причиной разрушения часто выступают микровключения, наличие которых обусловлено технологическими особенностями изготовления оптических элементов. При анализе оптического элемента на лучевую прочность, и оценке значений фрактальных размерностей можно анализировать статистику характерных значений. Наличие резко отличающихся значений фрактальных размерностей разрушений может свидетельствовать о различном механизме разрушения, что может быть дополнительным инструментом при исследовании лучевой прочности оптических элементов.

Таким образом, в настоящей работе разработана программа в среде MATLAB для детектирования контуров оператором Канни с последующим подсчетом фрактальной размерности методом Минковского. Выявлена перспективность применения метода подсчета фрактальной размерности для анализа изображений оптических элементов с микродефектами в лазерной технике при процедуре определения лучевой прочности оптических материалов. Определены характерные значения фрактальной размерности разных типов разрушения. Для «оплавления» среднее значение составило –  $1,22 \pm 0,03$ , для трещиноватого разрушения среднее значение составило –  $1,12 \pm 0,03$ , что позволяет различать их при анализе.

### Литература

1. Stratan A. et al. Automated test station for laser-induced damage threshold measurements according to ISO 21254-1, 2, 3, 4 standards // Laser-Induced Damage in Optical Materials. – 2012. – V. 8530. – P. 85301Y.
2. Гагарский С.В., Ермолаев В.С., Сергеев А.Н., Пузык М.В. Исследование лучевой прочности диэлектрических покрытий, нанесенных на оптическую поверхность // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 7. – С. 80–85.
3. Arenberg J.W. Revised damage frequency method for the determination of laser damage threshold // Laser-Induced Damage in Optical Materials. – 1994. – V. 2114. – P. 521–527.
4. Wood R.M. Laser-induced damage of optical materials. – Monograph. – Bristol; Philadelphia: IOP Publishing, 2003. – 241 p.
5. Храмов В.Ю., Гагарский С.В., Сергеев А.Н., Ахмадуллин Р.М. Лучевая прочность диэлектрических отражающих покрытий, нанесенных на поглощающую подложку // Изв. вузов. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 142–149.
6. Митин А.О. and Орешков В.И. Разработка и анализ методов исследования лучевой прочности оптических покрытий // Вестник РГРТУ. – 2016. – Т. 55. – С. 172–177.
7. Ding L., Goshtasby A. On the Canny edge detector // Pattern Recognition. – 2001. – V. 34. – № 3. – P. 721–725.
8. Kruijt B., van den Berg T.J.T.P. Optical scattering measurements of laser induced damage in the intraocular lens // PloS one. – 2012. – V. 7. – № 2. – P. e31764.

УДК 681.7.08, 535.243

**АНАЛИЗ ИСКРИВЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ СХЕМЫ  
ПОЛИХРОМАТОРА С НЕСКОЛЬКИМИ ВХОДНЫМИ ЩЕЛЯМИ**

Баев С.С.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Коротаев В.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе проводится анализ схемы полихроматора с компенсацией наложения порядков методом разделения спектральных интервалов. Исследуется увеличение ширины аппаратной функции, приводящее к ухудшению разрешающей способности прибора. Приводятся выражения, позволяющие рассчитать величину искривления спектральной линии. Показано, что искривление спектральных линий существенно ухудшает разрешающую способность прибора.

**Ключевые слова:** полихроматор, оптико-электронная система, спектральная линия, аппаратная функция, aberrация, матричный фотоприемник.

Контроль параметров искусственного освещения в культивационных сооружениях имеет важное значение для экономической эффективности выращивания сельскохозяйственных культур. Так как для искусственного освещения используют источники света с различными спектральными распределениями (газоразрядные, светодиодные) применение спектрорадиометрической аппаратуры для оперативного контроля параметров освещения позволяет существенно повысить точность измерений и исключить погрешность спектральной коррекции, присущую приборам с неселективными приемниками оптического излучения (ПОИ). Последние исследования в агробиологии выявили влияние на растение излучения в диапазоне от ультрафиолета до ближнего ИК [1, 2]. Данный диапазон покрывает более чем один порядок дифракции, и применение схем с дифракционными решетками сталкивается с проблемой устранения наложения порядков. В схеме спектрорадиометра с компенсацией наложения порядков методов разделения спектральных диапазонов входные щели находятся не в плоскости симметрии дифракционной решетки, что вносит известные погрешности искривления спектральных линий. В данной работе проведен анализ данных aberrаций, представлены результаты расчетов для макета спектрорадиометра.

Рассмотрим схему полихроматора с вогнутой дифракционной решеткой (рис. 1, а) (при использовании вогнутой решетки отпадает необходимость использования объектива и коллиматора, но тип используемой решетки в данном случае принципиальной разницы не имеет; все последующие рассмотрения можно адаптировать для других типов решеток). Если вогнутая решетка имеет равные радиусы кривизны в сагиттальной и меридиональной плоскостях ( $\chi=1$ ), тогда

$$\sin \varphi'(\lambda) = k\lambda N - \sin \varphi, \quad (1)$$

$$d'(\lambda) = \frac{\cos^2 \varphi'(\lambda)}{\cos \varphi + \cos \varphi'(\lambda)} - \frac{\cos^2 \varphi}{d}, \quad (2)$$

$$\bar{d}'(\lambda) = \frac{\cos^2 \varphi'(\lambda)}{\cos \varphi + \cos \varphi'(\lambda)} - \frac{1}{d}, \quad (3)$$

где  $\varphi$  и  $\varphi'$  – углы падения и дифракции для длины волны  $\lambda$ ;  $k$  – порядок дифракции;  $N$  – плотность штрихов решетки;  $R$  – радиус кривизны решетки;  $d'$  и  $\bar{d}'$  – фокусные расстояния в меридиональной и сагиттальной плоскости соответственно. Угол

отражения  $\psi'$  в меридиональной плоскости равен по модулю и противоположен по знаку углу падения  $\psi$  и для краткости формула не приводится.

При введении в схему дополнительной входной щели, появляется возможность разделения спектральных интервалов, регистрируемых одним многоэлементным фотоприемником (рис. 1, б). При этом необходимо расположить перед каждой щелью отрезающий светофильтр, ограничивающий для каждой щели свой спектральный интервал. Особенностью предложенной схемы является наличие двух и более входных щелей, изображения которых образуют несколько спектральных интервалов на одном матричном ПОИ, либо на нескольких линейных ПОИ. Таким образом, появляется возможность регистрировать прибором излучение в интервале длин волн более одного порядка дифракции, без наложения порядков.

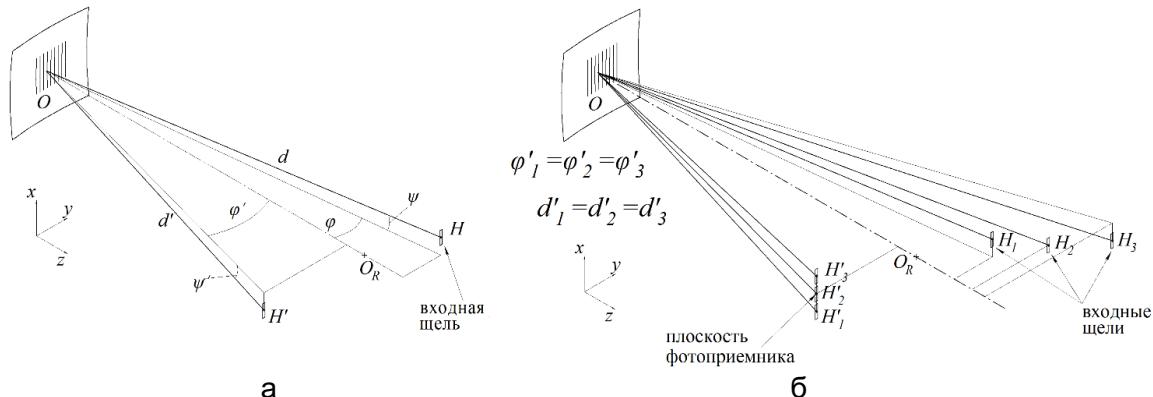


Рис. 4. Сравнение классической схемы полихроматора и схемы с несколькими входными щелями: классическая схема полихроматора с отражательной дифракционной решеткой и одной щелью (а); схема полихроматора с несколькими входными щелями (б)

Положение входных щелей при этом должно быть таким, чтобы поверхности изображений спектра от нескольких щелей совпадали. Недостатком данной схемы является существенное увеличение ширины аппаратной функции, вызванное искривлением спектральных линий из-за лучей, падающих на решетку вне плоскости симметрии. В данной работе исследуется искривление монохроматических изображений щелей, без детального описания расположения входных щелей в такой схеме.

Искривление монохроматических изображений щелей (спектральных линий) обусловлено тем, что на дифракционную решетку падает излучение из точек, лежащих вне плоскости симметрии решетки (вне сагиттальной плоскости). В точке сагиттального фокуса каждая точка щели изображается сагиттальной каустикой высотой  $\delta h$ , определяемой выражением

$$\delta h(\lambda) = \left(1 - \frac{d'(\lambda)}{d(\lambda)}\right) L, \quad (4)$$

где  $L$  – высота штрихов решетки. Радиус кривизны дуги изображения отдельной точки щели [3–5]:

$$\rho_A(\lambda) = \frac{-R \cos \varphi'(\lambda)}{B_1(\lambda)} K^2(\lambda). \quad (5)$$

Середины всех дуг находятся на параболе, показанной на рис. 2 пунктиром. В ее вершине радиус кривизны равен

$$\rho_O(\lambda) = -\frac{R \cos \varphi'(\lambda)}{D_1(\lambda)}. \quad (6)$$

Коэффициент  $B_1$ , который является одним из слагающих комы, создаваемой лучами, идущими вне плоскости симметрии. Коэффициент  $D_1$  определяет искривление спектральных линий, не ухудшающее их резкости. Они определяются выражениями

$$B_1(\lambda) = \frac{d'(\lambda)}{d} \sin \varphi \left( \frac{R}{d} - \frac{\cos \varphi}{\chi} \right) + \sin \varphi'(\lambda) \left( \frac{R(1-K(\lambda))^2}{d'(\lambda)} - \frac{\cos \varphi}{\chi} \right), \quad (7)$$

$$D_1(\lambda) = \frac{k \lambda N R}{d'(\lambda)}. \quad (8)$$

Углы наклона изображений точек щели  $\theta_1$  и  $\theta_2$  из геометрических соображений определяются (из выражений (5) и (6), рис. 2, а):

$$\sin(\theta_1(\lambda)) = \frac{x}{\rho_A(\lambda)} = \frac{\sin \psi d'(\lambda)}{\rho_A(\lambda)}, \quad (9)$$

$$\sin(\theta_2(\lambda)) = \frac{x}{-\rho_O(\lambda)} = \frac{\sin \psi d'(\lambda)}{-\rho_O(\lambda)}, \quad (10)$$

где  $x$  – координата центра сагиттальной каустики, в которой рассчитывается угол к оси  $x$ .

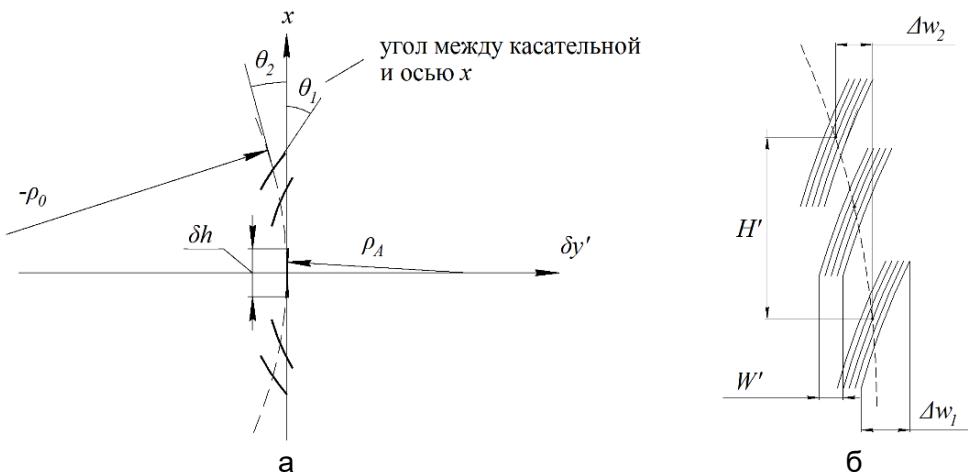


Рис. 2. Характер астигматических изображений точек щели (а); иллюстрация увеличения ширины изображения щели (б), где  $H'$  и  $W'$  – высота и ширина соответственно безаберрационного изображения щели

Увеличение ширины изображения щели приводит к ухудшению разрешающей способности прибора. Выразим увеличение ширины в первом приближении как:

$$\Delta W(\lambda) = \Delta w_1(\lambda) + \Delta w_2(\lambda), \quad (11)$$

где слагаемые определяются следующим образом:

$$\Delta w_1(\lambda) = \delta h(\lambda) \sin(\theta_1(\lambda)) = \left( 1 - \frac{d'(\lambda)}{d'(\lambda)} \right) L \frac{\sin \psi d'(\lambda)}{\rho_A(\lambda)}, \quad (12)$$

$$\Delta w_2(\lambda) = H'(\lambda) \sin(\theta_2(\lambda)) = \frac{d'(\lambda)}{d} \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'(\lambda)} L \frac{\sin \psi d'(\lambda)}{\rho_O(\lambda)}, \quad (13)$$

где  $H'$  – высота изображения щели. В случае если высота изображения щели меньше высоты чувствительного элемента фотоприемника, то  $H'$  определяется высотой чувствительного элемента.

В схемах монохроматоров для компенсации искривления спектральных линий применяют входные и выходные щели кривизной определенного радиуса. Однако в полихроматорах с многоэлементными фотоприемниками не представляется возможным полностью скомпенсировать такое увеличение ширины аппаратной функции.

Для демонстрации величины уширения аппаратной функции рассчитаем  $\Delta W(\lambda)$  для макета полихроматора со следующими параметрами. Дифракционная решетка с радиусом кривизны  $R=125$  мм, увеличение оптической системы  $V(\lambda)=0,79-0,83$  (зависит от длины волны излучения), две входные щели шириной  $W=0,1$  мм и высотой  $H=3$  мм, расположенные в меридиональной плоскости (вне плоскости симметрии решетки) под углами  $1,8^\circ$  и минус  $1,6^\circ$  соответственно. В качестве фотоприемников выступают многоэлементные линейные фотоприемники с высотой чувствительных элементов  $0,125$  мм. Расчет производится для диапазонов длин волн  $350-650$  и  $600-1000$  нм.

Минимальная высота безаберрационного изображения щели  $2,49$ , что больше высоты чувствительных элементов фотоприемников ( $0,125$  мм). Следовательно, можно принять в качестве  $H'$  высоту чувствительного элемента. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

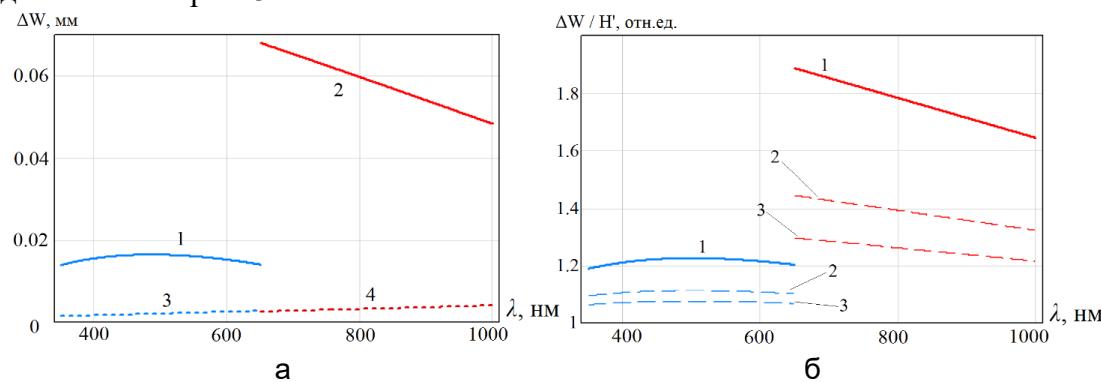


Рис. 3. 1, 2 – увеличение ширины изображения спектральной линии по сравнению с безаберрационным (3, 4) изображением щелей (а); относительное увеличение ширины аппаратной функции при различной ширине входных щелей:  
1 –  $0,1$  мм; 2 –  $0,2$  мм; 3 –  $0,3$  мм (б)

На рис. 3, а пунктирной линией представлена для наглядности ширина безаберрационного изображения щелей. Рис. 3, б демонстрирует существенное относительное увеличение ширины аппаратной функции (почти в два раза), что значительно снижает разрешающую способность прибора.

**Заключение.** В работе проведен анализ увеличения ширины аппаратной функции полихроматора, обусловленного искривлением монохроматических изображений входной щели, расположенной вне сагиттальной плоскости. Приведены выражения, позволяющие рассчитать в первом приближении увеличение ширины изображения щели. На примере расчета макета полихроматора показано, что увеличение ширины изображения щели существенно увеличивает ширину аппаратной функции прибора.

## Литература

1. Li Q., Kubota C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce // Environmental and Experimental Botany. – 2009. – V. 67 – № 1. – P. 59–64.
2. Pazuki A., Aflaki F., Pessarakli M., Gurel E., Gurel S. Plant Responses to Extended Photosynthetically Active Radiation (EPAR) // Adv. Plants Agric. Res. – 2017. – V. 7. – № 3. – P. 313–318.
3. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
4. Тарасов К.И. Спектральные приборы. – Л.: Машиностроение, 1968. – 388 с.
5. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. – М.: Наука, 1972. – 376 с.

УДК 621.373.826

**МОЩНЫЙ ИСТОЧНИК ПИКОСЕКУНДНОГО  
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЛУННОГО ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА**

**Балмашнов Р.В.<sup>1</sup>, Давтян А.С.<sup>2</sup>, Корнев А.Ф.<sup>2</sup>, Коваль В.В.<sup>1,2</sup>, Кучма И.Г.<sup>2</sup>**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., профессор Викторов Е.А.<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>ООО «Лазеры и оптические системы», Санкт-Петербург**

В работе представлены результаты разработки и исследования мощного 100 Вт (0,5 Дж/200 Гц) Nd:YAG лазера с диодной накачкой с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 76 пс. Лазер построен по схеме усиления излучения задающего генератора в двухпроходовом двухкаскадном усилителе на активных элементах Nd:YAG Ø15×140 мм<sup>2</sup> и Ø10×140 мм<sup>2</sup>. В рамках работы проведены эксперименты по измерению эффективности преобразования излучения во вторую гармонику в кристалле LBO 17×17×7 мм<sup>3</sup>, эффективность ГВГ составила 64%. Расходимость выходного излучения лазерного усилителя составила менее 1,5 от дифракционного предела.

**Ключевые слова:** твердотельный лазер, Nd:YAG, диодная накачка, пикосекундная длительность импульсов, генерация второй гармоники.

**Введение.** Пикосекундные лазеры с высокой выходной энергией импульса используются для решения большого количества прикладных и научно-исследовательских задач [1]. Одним из наиболее актуальных и важных приложений пикосекундных лазеров является высокоточная космическая лазерная дальномерия [2, 3].

Применяемые в дальномерии пикосекундные лазеры с высокой выходной энергией импульса (более 100 мДж), как правило, работают на низкой частоте следования импульсов (менее 20 Гц), определяемой использованием ламповой накачки. Короткая длительность импульсов в таких лазерах обеспечивается главным образом за счет использования ВРМБ-компрессии. Например, в статье [4] описывается Nd:YAG лазер с модуляцией добротности и ВРМБ-компрессией, работающий на частоте следования импульсов 10 Гц, с выходной энергией 250 мДж и длительностью импульса 130 пс, который используется в Институте Астрономии Латвийского Университета для измерения расстояния до космических аппаратов. В спутниковом лазерном дальномере обсерватории Apache Point (APPOLO), Нью-Мехико, США в качестве источника лазерного излучения используется Nd:YAG лазер на второй гармонике (532 нм), работающий на частоте 20 Гц с выходной энергией 115 мДж и длительностью импульса 100 пс [5]. В обсерватории McDonald, Техас, США используется источник лазерного излучения с длиной волны 532 нм, длительностью импульсов 200 пс и выходной энергией 150 мДж. При этом частота следования импульсов этого лазера не превышает 10 Гц [6]. В спутниковом лазерном дальномере обсерватории CERGA (Грас, Франция) используется Nd:YAG лазер с длиной волны 1064 нм, длительностью импульсов 150 пс и выходной энергией 300 мДж, работающий на частоте 10 Гц. Упомянутый лазер также может работать на длине волны 532 нм, при этом эффективность преобразования излучения во вторую гармонику составляет 65% [7].

Использование диодной накачки в усилителях пикосекундного излучения с высокой выходной энергией позволяет увеличить частоту следования импульсов до сотен герц. Например, в [8] представлена лазерная система, генерирующая 64 пс импульсы на длине волны 1064 нм с энергией 130 мДж на частоте следования импульсов 300 Гц. В этой системе импульсы Nd:YVO<sub>4</sub> задающего генератора были усилены в регенеративном усилителе до уровня 1 мДж, а затем усилены в двухкаскадном двухпроходовом Nd:YAG усилителе с квазинепрерывной диодной накачкой. В [9] описана лазерная система с диодной накачкой, в которой излучение Nd:YVO<sub>4</sub> задающего генератора с модуляцией добротности усиливается в линейном регенеративном усилителе, а затем в трехкаскадном двухпроходовом выходном

усилителе на активных элементах Nd:YAG. Система генерирует импульсы с энергией 316,5 мДж, длительностью 50 пс на частоте 100 Гц.

Основными проблемами, препятствующими увеличению выходной энергии лазеров с пикосекундной длительностью импульсов, являются пробой оптических элементов и эффект мелкомасштабной самофокусировки излучения, которые вызваны высокой пиковой мощностью излучения. Значение порога оптического пробоя увеличивается пропорционально квадратному корню из длительности импульса [10]. Эффект самофокусировки излучения приводит к повреждению активных элементов лазера, ухудшению качества выходного излучения и увеличению расходности лазерного излучения.

В настоящей работе мы сообщаем о разработке мощной пикосекундной лазерной системы, энергетические характеристики которой превышают характеристики аналогов [4–9]. Лазерная система обладает высокой стабильностью формы импульса, высокой выходной энергией и высокой частотой следования импульсов.

**Оптическая схема лазера.** Задающий генератор (ЗГ) лазерной системы построен по схеме усиления излучения пикосекундного микрочип-лазера с пассивной модуляцией добротности в регенеративном усилителе (РУ) (рис. 1, а). Микрочип-лазер с импульсной диодной накачкой на длине волны 808 нм генерирует спектрально-ограниченные импульсы с длительностью 90 пс и энергией 100 нДж. Излучение микрочип-лазера с длиной волны 1064 нм вводится в одномодовое волокно с сохранением поляризации излучения, которое используется в качестве линии оптической задержки.

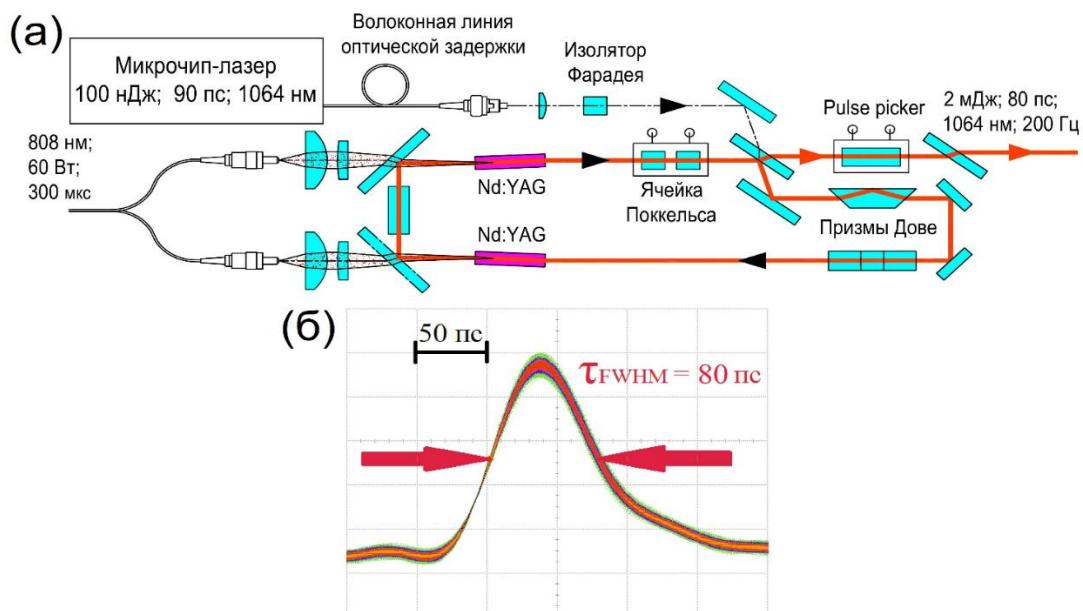


Рис. 1. Принципиальная схема задающего генератора (а) и осциллограмма импульса на выходе регенеративного усилителя в режиме накопления (10<sup>4</sup> импульсов) (б)

Прошедшее линию задержки излучение оптически изолируется от микрочип-лазера с помощью изолатора Фарадея и совмещается с модой ТЕM<sub>00</sub> регенеративного усилителя с помощью телескопа Галилея. Две ортогональные призмы Дове, установленные в шестизеркальном резонаторе РУ, обеспечивают устойчивость резонатора к угловым разъюстировкам.

Два активных элемента Nd:YAG регенеративного усилителя продольно накачиваются двумя 808 нм диодными модулями накачки, пиковая мощность каждого диодного модуля составляет 30 Вт. Остаточное двулучепреломление и паразитное

пропускание выходного поляризатора приводят к появлению паразитных предимпульсов на выходе лазера. Чтобы избавиться от этих предимпульсов, используется селектор импульсов (pulse picker) [11].

ЗГ имеет выходную энергию 2 мДж со среднеквадратичным отклонением около 0,3% и оптической эффективностью около 20%. Длительность усиленного в РУ выходного импульса ЗГ составляет 80 пс. Качество выходного излучения ЗГ  $M^2=1,3$ . Осциллограмма импульса задающего генератора приведена на рис. 1, б.

Излучение задающего генератора проходит формирующую оптическую систему, которая используется для совмещения центральной части Гауссова пучка ЗГ с апертурой выходного усилителя мощности. Пучок проходит через поляризатор и систему зеркал и направляется в двухпроходовый двухкаскадный выходной усилитель (рис. 2, а).

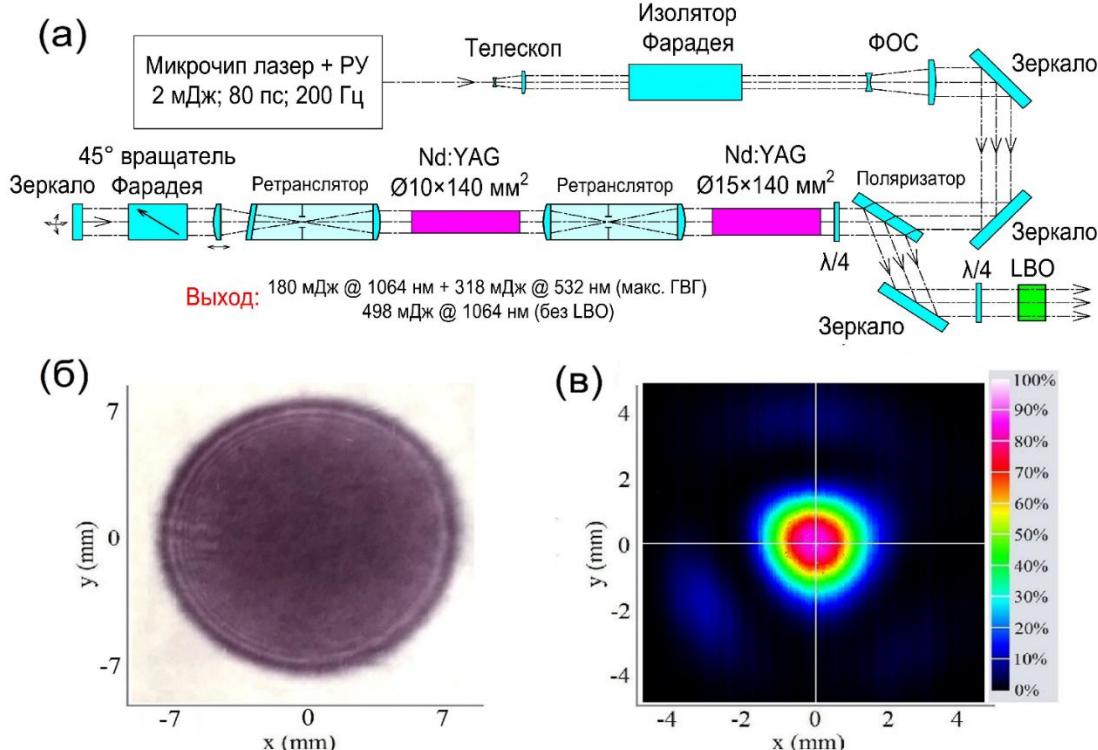


Рис. 2. Принципиальная схема выходного усилителя (а); отпечаток импульса выходного излучения усилителя в ближней зоне (б) и поперечное распределение интенсивности пучка в дальней зоне (в)

Выходной усилитель состоит из двух каскадов усиления с активными элементами Nd:YAG  $\varnothing 10 \times 140 \text{ мм}^2$  и Nd:YAG  $\varnothing 15 \times 140 \text{ мм}^2$ . Каждый активный элемент накачивается тремя лазерными диодными матрицами с общей пиковой мощностью 19,5 кВт на каждый активный элемент. Частота импульсов накачки составляет 200 Гц при длительности импульса накачки 230 мкс.

Для компенсации термически наведенного двулучепреломления между каскадами усиления установлен  $90^\circ$  кварцевый вращатель. После активных элементов излучение ретранслируется и проходит через  $45^\circ$  вращатель Фарадея, который также участвует в компенсации термически наведенного двулучепреломления и обеспечивает вывод излучения из выходного усилителя мощности. После первого прохода через усилитель пучок отражается от глухого зеркала, делает второй проход через активные элементы усилителя и выводится из лазерной системы с помощью поляризатора. Поляризация усиливаемого излучения на обоих проходах является круговой, это позволяет снизить вероятность появления мелкомасштабной самофокусировки и избавиться от паразитного самовозбуждения на оптических поверхностях усилителя [12]. Для защиты

ЗГ от остаточной деполяризованной компоненты излучения используется изолятор Фарадея.

Для совмещения апертур активных элементов и компенсации стационарной компоненты термически наведенной линзы, а также для пространственной фильтрации излучения в схеме усилителя используются вакуумированные ретрансляторы с пространственными фильтрами. Ретрансляторы усилителя спроектированы с учетом термически наведенных в активных элементах линз так, чтобы лазерный пучок на выходе усилителя был близок к коллимированному. Жидкостное охлаждение обеспечивает однородный отвод тепла от активных элементов.

Для компенсации нестационарных искажений волнового фронта низких порядков и для достижения стабильно малой расходимости в схеме лазера используется адаптивный компенсатор термически наведенных линзы и клина с анализатором на основе квадрантного фотодиода, и астигматической линзы [13]. Исполнительными элементами компенсатора являются угловая двухкоординатная моторизированная подвижка и моторизированный линейный транслятор, на которые установлены глухое  $0^\circ$  зеркало и линза одного из ретрансляторов соответственно (рис. 2, а). Чувствительность анализатора к изменению сферичности волнового фронта составляет  $\lambda/100$  [13].

**Результаты.** В активных элементах  $\varnothing 10 \times 140 \text{ mm}^2$  и  $\varnothing 15 \times 140 \text{ mm}^2$  достигнуты значения однопроходового слабосигнального усиления 10,8 и 3 соответственно. При этом длительность импульса накачки составляла 230 мкс при энергии накачки 4,5 Дж на каждый активный элемент. Выходная энергия 498 мДж с СКО 0,9% на частоте следования импульсов 200 Гц была получена при уровне входного сигнала 0,47 мДж. Это значение выходной энергии соответствует насыщенному коэффициенту усиления около 1050 во всем двухпроходовом двухкаскадном усилителе. Зависимость выходной энергии лазера от оптической энергии накачки показана на рис. 3, а.

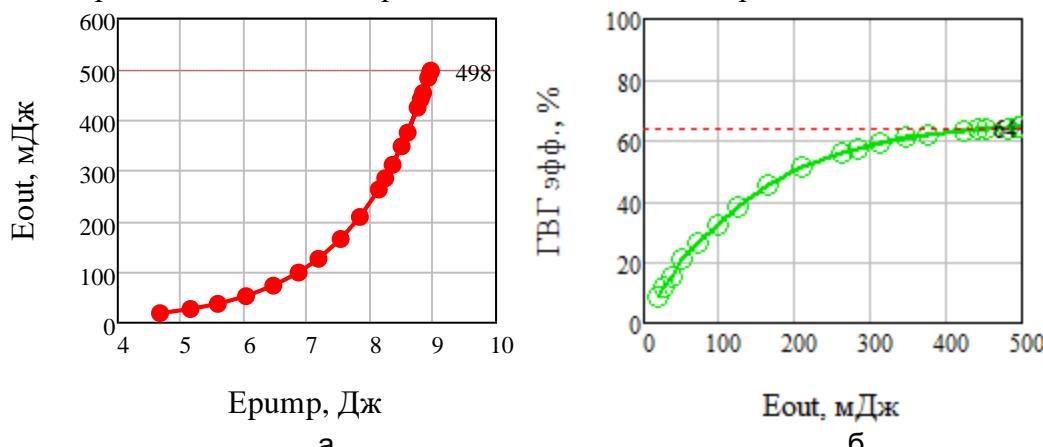


Рис. 3. Зависимости энергии излучения  $E_{\text{out}}$  с длиной волны 1064 нм: выходной энергии от оптической энергии накачки (а) и эффективности преобразования во вторую гармонику от падающей на кристалл энергии излучения (б)

Фокусные расстояния термически наведенных линз при максимальной накачке были равны 1,3 м и 2,9 м в активных элементах  $\varnothing 10 \times 140 \text{ mm}^2$  и  $\varnothing 15 \times 140 \text{ mm}^2$  соответственно. Компенсация двулучепреломления обеспечила значение деполяризованной компоненты не более 2% от общей выходной энергии. Поперечное распределение пучка в ближней зоне в режиме работы 498 мДж/76 пс/200 Гц было близко к П-образному, отпечаток импульса выходного излучения усилителя в ближней зоне приведен на рис. 2, б. Расходимость пучка составила 1,5 значения дифракционного предела, поперечное распределение пучка в дальней зоне приведено на рис. 2, в.

Съем энергии был ограничен низким порогом оптического пробоя для импульсов с пикосекундной длительностью [14]. Чтобы уменьшить вероятность повреждения оптики и возникновения мелкомасштабной самофокусировки лазерного излучения, плотность энергии излучения на выходных оптических элементах не превышала 0,3 Дж/см<sup>2</sup>.

Для оценки вероятности возникновения мелкомасштабной самофокусировки использовалось понятие интеграла распада (В-интеграл) [15], с помощью которого описывается логарифмический рост быстрорастущего возмущения интенсивности в нелинейной активной среде. Для предотвращения ухудшения качества выходного пучка и повреждения активной среды, значение интеграла распада не должно превышать 2 [16]. Расчет интеграла распада применительно к разработанному лазеру показал, что при максимальной выходной энергии значение интеграла распада на выходном активном элементе составляет 1,2.

В разработанной установке проведены эксперименты по преобразованию излучения 1064 нм основной гармоники Nd:YAG в излучение второй гармоники с длиной волны 532 нм. В качестве генератора второй гармоники использовался кристалл LBO (габариты 17×17×7 мм<sup>3</sup>, ориентация:  $\theta=20.9^\circ$ ,  $\phi=90^\circ$ ) со II типом фазового синхронизма. Излучение, падающее на кристалл LBO, имело круговую поляризацию за счет прохождения излучения через четвертьволновую пластину. На выходе лазера излучение с длиной волны 532 нм имело линейную поляризацию. Непреобразованная во вторую гармонику часть выходного излучения с длиной волны 1064 нм имела круговую поляризацию. Максимальная эффективность генерации второй гармоники составила 64% (рис. 3, б), при этом энергия излучения на длине волны 532 нм составила 318 мДж. При преобразовании излучения во вторую гармонику наблюдался эффект укорочения длительности выходного импульса до 64 пс за счет низкой эффективности преобразования участков временного распределения импульсов с малой интенсивностью [17].

Габаритные размеры лазерного излучателя составляют 1100×600×215 мм<sup>3</sup>. Внешний вид излучателя приведен на рис. 4.

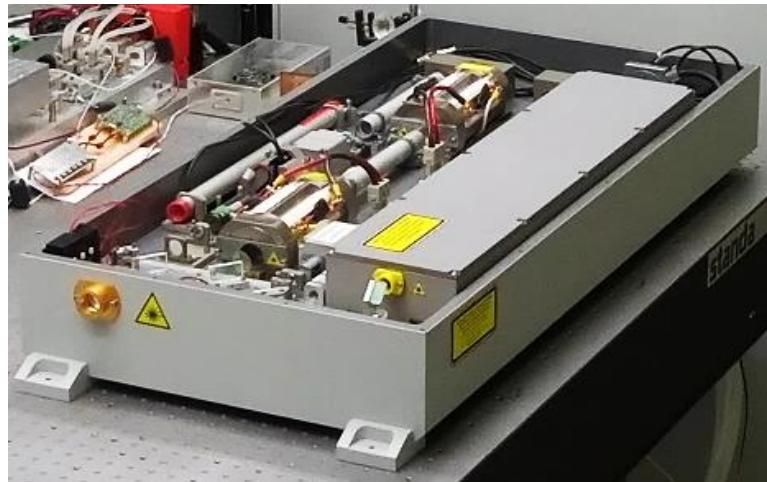


Рис. 4. Внешний вид пикосекундного лазера для лунного лазерного дальномера

**Заключение.** Разработанная пикосекундная лазерная система обладает высокой стабильностью формы импульса, высокой выходной энергией и высокой частотой следования импульсов. Максимальная полученная энергия лазера на длине волны 1064 нм при длительности импульсов 76 пс и частоте следования импульсов 200 Гц составила 498 мДж. На длине волны 532 нм максимальная энергия составила 318 мДж при эффективности преобразования излучения во вторую гармонику 64%, при этом

длительность импульса 532 нм излучения составила 64 пс. СКО выходной энергии составило 0,9% и 1,5% для излучения с длиной волны 1064 нм и 532 нм соответственно. Расходимость выходного излучения составила менее 1,5 от дифракционного предела.

### Литература

1. Agnesi A., Pirzio F. High gain solid-state amplifiers for picosecond pulses // Advances in Solid State Lasers Development and Applications. – 2010. – P. 213–238.
2. Wilkinson M. et al. The next generation of satellite laser ranging systems // Journal of Geodesy. – 2018. – P. 1–21.
3. Kornev A.F., Balmashnov R.V., Kuchma I.G., Davtian A.S., Oborotov D.O. 0.43 J/100 ps Nd: YAG laser with adaptive compensation of thermally induced lens // Optics letters. – 2018. – V. 43. – № 18. – P. 4394–4397.
4. Buzelis R., Kosenko J., Murauskas-Ekspla E., Lapushka K., Ai Ui. Q-switched SBS-compressed Nd: YAG laser for satellite ranging [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cddis.nasa.gov/lw11/docs/sl212a.pdf>, своб.
5. Murphy T.W. et al. The Apache Point Observatory lunar laser-ranging operation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tmurphy.physics.ucsd.edu/apollo/doc/matera.pdf>, своб.
6. Murphy T.W. Lunar laser ranging: the millimeter challenge // Reports on Progress in Physics. – 2013. – V. 76. – № 7. – P. 076901.
7. Courde C. et al. Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station // Astronomy & Astrophysics. – 2017. – V. 602. – P. A90.
8. Noom D.W.E. et al. High-energy, high-repetition-rate picosecond pulses from a quasi-CW diode-pumped Nd: YAG system // Optics letters. – 2013. – V. 38. – № 16. – P. 3021–3023.
9. Su H., Peng Y., Chen J., Lu X., Li Y., Wang P., Leng Y. High Energy, 100 Hz, Picosecond Laser for OPCPA Pumping // Applied Sciences. – 2017. – V. 7. – № 10. – P. 997.
10. Lowdermilk W., Milam D. Laser-induced surface and coating damage // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1981. – V. 17. – № 9. – P. 1888–1903.
11. Omatsu T., Nawata K., Okida M., Furuki K. MW ps pulse generation at sub-MHz repetition rates from a phase conjugate Nd: YVO<sub>4</sub> bounce amplifier // Optics express. – 2007. – V. 15. – № 15. – P. 9123–9128.
12. Auric D., Labadens A. On the use of a circulary polarized beam to reduce the self-focussing effect in a glass rod amplifier // Optics Communications. – 1977. – V. 21. – № 2. – P. 241–242.
13. Balmashnov R.V., Kornev A.F., Kuchma I.G. Adaptive compensator of thermally induced lens with analyzer based on quadrant photodiode // International Conference Laser Optics. – 2018. – P. 189–189.
14. Balmashnov R.V., Katsev Y.V., Kornev A.F., Kuchma I.G., Oborotov D.O. 100 ps 360 mJ 200 Hz Nd: YAG laser for the lunar laser ranging // International Conference Laser Optics. – 2016. – P. R6-4–R6-4.
15. Koechner W. Solid-State Laser Engineering. – 5th ed. – Springer, 1999. – 408 p.
16. Hunt J.T., Manes K.R., Renard P.A. Hot images from obscurations // Applied optics. – 1993. – V. 32. – № 30. – P. 5973–5982.
17. Murphy Jr T.W. et al. The apache point observatory lunar laser-ranging operation: instrument description and first detections // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2008. – V. 120. – № 863. – P. 20–37.

УДК 666.651, 543.42

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОЗРАЧНОЙ

КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ  $Dy:(Lu,Y,La)_2O_3$ Басырова Л.Р.<sup>1</sup>, Лойко П.А.<sup>1</sup>, Балабанов С.С.<sup>2</sup>Научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. Лойко П.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН

В работе исследованы спектроскопические свойства прозрачной керамики на основе смешанных оксидов  $(Lu,Y,La)_2O_3$  с различным соотношением Lu/Y/La, активированных ионами диспрозия  $Dy^{3+}$ , полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

**Ключевые слова:** прозрачная керамика, сесквиоксид, ионы диспрозия, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, люминесценция, комбинационное рассеяние.

Синтез керамик был выполнен в ИХВВ РАН в рамках темы государственного задания №0095-2018-0016.

**Введение.** В настоящее время разработка, изучение и использование поликристаллических материалов, активированных ионами редкоземельных элементов ( $RE^{3+}$ ), вызывает большой научный и практический интерес. В сравнении с методами выращивания монокристаллов, прозрачные керамики обладают рядом преимуществ, таких как меньшие температуры синтеза, более однородное распределение активных ионов по объему матрицы, а также меньшие стоимость и время производства [1]. Прозрачные керамики с ионами  $RE^{3+}$  привлекательны в качестве активных сред лазеров.

Твердотельные лазеры, излучающие в видимой области спектра, находят широкое применение в телекоммуникациях, медицине, биотехнологиях и исследованиях космоса [2–4]. Для получения лазерной генерации в видимой области спектра могут быть использованы такие ионы редких земель, как  $Pr^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$ ,  $Dy^{3+}$ ,  $Sm^{3+}$  и  $Eu^{3+}$ . Данная работа посвящена исследованию новых материалов с ионами диспрозия ( $Dy^{3+}$ ). В работе А.А. Каминского и др. [5] впервые были реализованы лазеры на кристаллах  $KY(WO_4)_2$  и  $KGd(WO_4)_2$ , допированных ионами  $Dy^{3+}$ , с длинами волн генерации около 570 нм и 660 нм, соответствующим переходам  $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$  и  $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{11/2}$ , соответственно. Ввиду стремительного развития лазерных диодов на основе  $GaInS$  в дальнейшем была также получена лазерная генерация на кристаллах  $Dy:Y_3Al_5O_{12}$  [6],  $Dy,Tb:LiLuF_4$  [7] и  $Dy:ZnWO_4$  [8].

Кристаллы сесквиоксида  $Y_2O_3$  легко допируются редкоземельными ионами и являются перспективным лазерным материалом из-за хороших теплофизических свойств (высокой теплопроводности) и химической стабильности при больших концентрациях активных ионов. В работе [9] была показана возможность синтеза поликристаллического материала данного состава высокого оптического качества. Получение керамики на основе смешанных оксидов  $Lu_2O_3$ ,  $Y_2O_3$ ,  $La_2O_3$  ранее не было описано.

В работе прозрачные керамики составов  $Dy:(Lu,Y,La)_2O_3$  были получены методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Были измерены спектры комбинационного рассеяния (КР) света, спектры поглощения и люминесценции ионов  $Dy^{3+}$ , а также кинетика затухания люминесценции.

## Экспериментальная часть

- Синтез образцов  $Dy:(Lu,Y,La)_2O_3$ . Синтез образцов производился в институте химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, Нижний Новгород (С.С. Балабанов, В.А. Кошкин, Д.А. Пермин). Получение порошков смешанных оксидов  $(Lu_{0.25}Y_{0.66}La_{0.08}Dy_{0.01})_2O_3$ ,  $(Lu_{0.44}Y_{0.485}La_{0.065}Dy_{0.01})_2O_3$ ,  $(Lu_{0.69}Y_{0.25}La_{0.05}Dy_{0.01})_2O_3$ ,

$(Y_{0.89}La_{0.1}Dy_{0.01})_2O_3$  было проведено самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС) по глицин-нитратной методике. Исходными веществами для синтеза прекурсоров СВС являлись оксиды лютения, иттрия, лантана и диспрозия (чистота: 99,99%), азотная кислота (99,9999%) и глицин  $NH_2CH_2COOH$  (99,9%). Индивидуальные нитраты РЗЭ получали растворением навески  $\sim 10$  г оксидов в стехиометрическом количестве азотной кислоты при нагревании. Нитраты смешивались в зависимости от требуемого состава смешанного оксида. К полученному раствору нитратов металлов добавляли глицин в мольном соотношении 1:1 и выпаривали воду при температуре  $\sim 110^\circ C$ . Навеску такой смеси в кварцевой колбе помещали в предварительно нагретую до  $400^\circ C$  печь, где происходило инициирование окислительно-восстановительных экзотермических реакций и их распространение на весь объем образца.

Полученный таким образом порошок мололи в шаровой мельнице шарами из оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, диаметром  $\varnothing 5$  мм в течение 24 ч в изопропиловом спирте. Далее высушивали суспензию в сушильном шкафу при температуре  $80^\circ C$ , затем для удаления остатков спирта прокаливали на воздухе в муфельной печи при температуре  $700^\circ C$  в течение 5 ч.

Для получения керамики синтезированные порошки подвергались одноосному прессованию при давлении 250 МПа. Полученные компакты в виде дисков диаметром 13 мм и толщиной  $\sim 2$  мм спекали в вакуумной печи СНВЭ 1.3.1 с вольфрамовыми нагревателями при остаточном давлении  $10^{-3}$  Па и температуре  $1780^\circ C$  в течение 3 ч со скоростью нагрева  $10^\circ C/\text{мин}$ . После этого образцы дополнительно прокаливались на воздухе при температуре  $1000^\circ C$  в течение 2 ч и полировались с обеих сторон суспензией алмазного порошка.

2. Характеризация материалов. Исследование полученных образцов прозрачной керамики  $Dy:(Lu,Y,La)_2O_3$  проводилось с помощью измерения спектров КР и люминесценции на конфокальном микроспектрометре *inVia* Renishaw, спектроскопии поглощения света на спектрофотометре UV-3600 (Shimadzu) и спектроскопии в ИК-диапазоне с использованием спектрофотометра Tensor 27 (Bruker). Также была изучена кинетика затухания люминесценции ионов  $Dy^{3+}$  в видимом диапазоне спектра с помощью спектрофлуориметра Cary Eclipse.

### Результаты и их обсуждение

1. Спектры комбинационного рассеяния света. Спектры КР для синтезированных прозрачных керамик были измерены для определения влияния «смешанного» состава оксидов матрицы на фоновые колебания решетки. На рис. 1 представлены спектры КР образцов прозрачной керамики  $Dy:(Lu,Y,La)_2O_3$  с различным соотношением  $Lu/Y/La$  в области  $100\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ .

Измеренные спектры КР характерны для кубических кристаллов сесквиоксидов  $RE_2O_3$  (где  $RE=Y$ ,  $Lu$ ,  $Sc$ , и др.), и, в частности, оксида иттрия  $Y_2O_3$ , при этом отдельные полосы в спектре КР уширены по отношению к монокристаллам.  $Y_2O_3$  является кубическим кристаллом (пространственная группа симметрии  $Ia\bar{3}-T_1^7h$ , № 206, так называемая структура С-типа). Теория групп предсказывает следующие неприводимые представления в центре зоны Бриллюэна  $\Gamma$  ( $k=0$ ):  $\Gamma=4A_g+4E_g+14F_g+5A_u+5E_u+17F_u$ , из которых 22 моды ( $A_g$ ,  $E_g$  и  $F_g$ ) активны в КР-спектрах. Наиболее интенсивная полоса КР относится к колебаниям  $A_g+F_g$ . Ее положение монотонно изменяется от  $370$  до  $385\text{ cm}^{-1}$  при увеличении содержания  $Lu$  в матрице. Максимальная энергия фонона для исследованных керамик варьируется от  $584$  до  $604\text{ cm}^{-1}$ , в зависимости от содержания  $Lu$ .

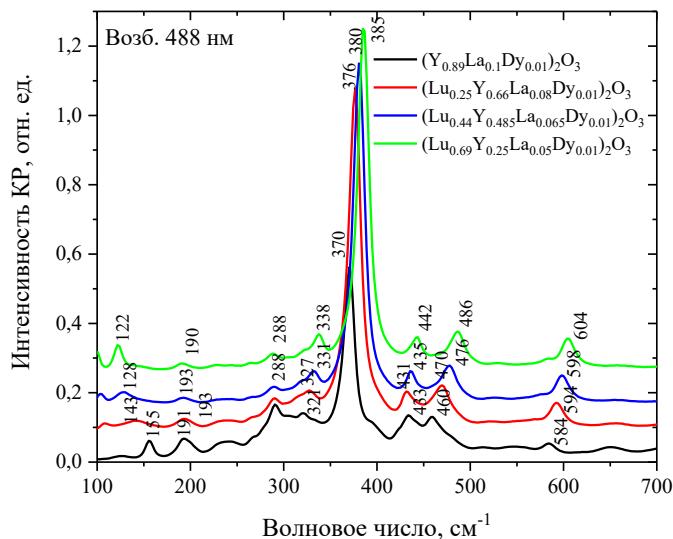


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света для прозрачных керамик «смешанного» состава  $Dy:(Lu,Y,La)_2O_3$ . Длина волны возбуждения 488 нм

2. Спектры поглощения. Спектр поглощения прозрачных керамик  $Dy:(Lu,Y,La)_2O_3$  в видимом и ближнем ИК спектральном диапазонах (длины волн 300–3000 нм) показан на рис. 2, а. В спектрах присутствуют полосы, характерные для поглощения ионов  $Dy^{3+}$  и связанные с переходами из основного состояния данных ионов ( $^6H_{15/2}$ ) в возбужденные состояния от  $^6H_{13/2}$  до  $^6P_{7/2}+^4I_{11/2}$ . В среднем ИК диапазоне, область прозрачности матрицы простирается до ~9 мкм.

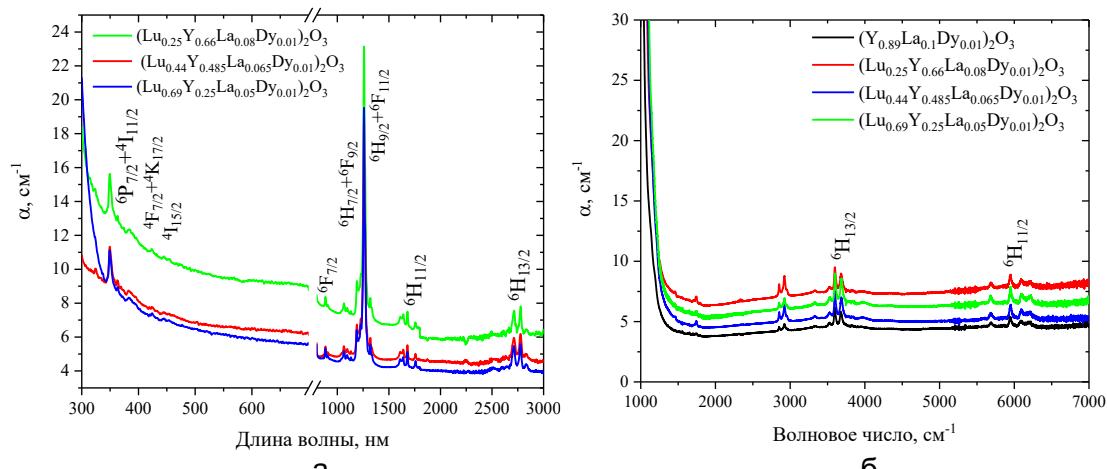


Рис. 2. Спектры поглощения прозрачных керамик  $Dy:(Lu,Y,La)_2O_3$ : видимая и ближняя ИК спектральная область, 300–3000 нм (а); ИК-спектры, 1000–7000  $cm^{-1}$  (б)

3. Спектры и кинетика затухания люминесценции. Спектр люминесценции ионов  $Dy^{3+}$  в образцах прозрачных керамик  $Dy:(Lu,Y,La)_2O_3$  в диапазоне длин волн 500–900 нм приведен на рис. 3, а (длина волны возбуждения 488 нм). В спектре видны четыре интенсивных полосы люминесценции с центрами на длинах волн порядка 573, 670, 757, 835 нм, соответствующие переходам ионов  $Dy^{3+}$   $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$ ,  $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{11/2}$ ,  $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{9/2}+^6F_{11/2}$  и  $^4F_{9/2} \rightarrow ^6F_{9/2}+^6H_{7/2}$ , соответственно. Наиболее интенсивная полоса соответствует переходу  $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$ . Цвет люминесценции – желто-зеленый.

Кинетики затухания люминесценции из состояния  $^4F_{9/2}$  ионов  $Dy^{3+}$ , построенные в полулогарифмическом масштабе, приведены на рис. 3, б. Люминесценция регистрировалась на длине волны 573 нм (переход  $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$ ) при возбуждении на длине волны 300 нм. Измеренные кинетики содержат быструю компоненту и

медленную моно-экспоненциальную часть с характерным временем затухания люминесценции около 0,22 мс.

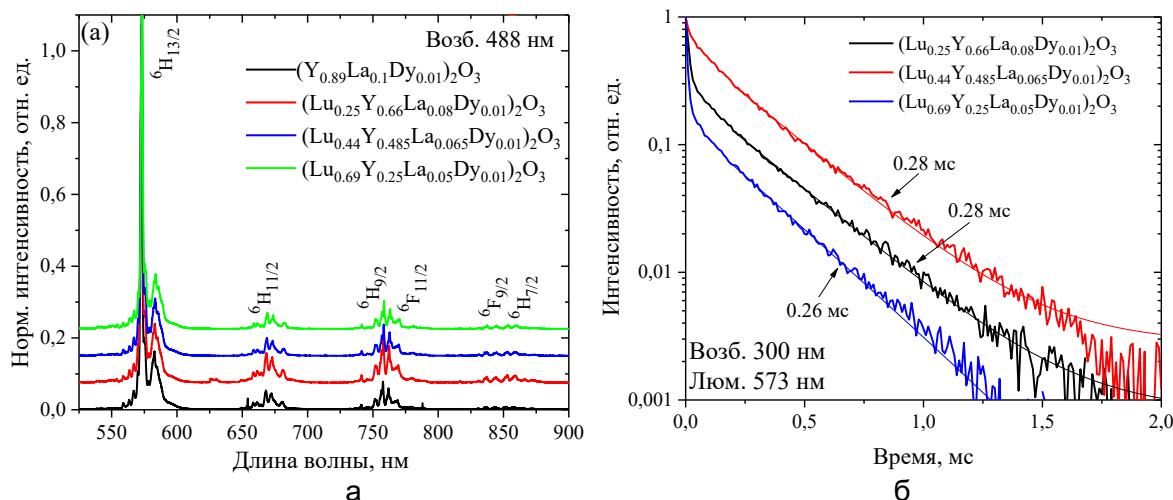


Рис. 3. Спектрально-кинетические характеристики люминесценции ионов  $Dy^{3+}$  в прозрачных керамиках  $Dy:(Lu,Y,La)_2O_3$ : нормированные спектры люминесценции, длина волны возбуждения – 488 нм (а); кинетика затухания люминесценции из метастабильного состояния  ${}^4F_{9/2}$ , длина волны возбуждения – 300 нм (б)

**Заключение.** Прозрачные керамики на основе смешанных оксидов  $(Lu,Y,La)_2O_3$ , активированные ионами диспрозия  $Dy^{3+}$ , являются перспективными люминесцентными материалами для видимой области спектра. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на установлении влияния концентрации ионов  $Dy^{3+}$  на люминесцентные свойства керамик.

## Литература

1. Ikesue A., Aung Y.L. Ceramic laser materials // Nat. Photonics. – 2008. – V. 2. – P. 721–727.
2. Fang Q., Lu D., Yu H., Zhang H., Wang J. Self-frequency-doubled vibronic yellow Yb:YCOB laser at wavelength of 570 nm // Opt. Lett. – 2016. – V. 41. – P. 1002–1005.
3. Cavalli E., Bovero E., Belletti A. Optical spectroscopy of  $CaMoO_4:Dy^{3+}$  single crystals // J. Phys.: Condens. Matter. – 2008. – V. 14. – P. 5221–5228.
4. Higuchi M., Sasaki R., Takahashi J. Float zone growth of  $Dy:GdVO_4$  single crystals for potential use in solid-state yellow lasers // J. Cryst. Growth. – 2009. – V. 311. – P. 4549–4552.
5. Kaminskii A., Hommerich U., Temple D., Tae Seo J., Ueda K., Bagaev S., Pavlyuk A. Visible Laser Action of  $Dy^{3+}$  Ions in Monoclinic  $KY(WO_4)_2$  and  $KGd(WO_4)_2$  Crystals under Xe-Flashlamp Pumping // J. Appl. Phys. – 2000. – V. 39. – P. L208–L211.
6. Bowman S.R., O'Connor S., Condon N.J. Diode pumped yellow dysprosium lasers // Opt. Express. – 2012. – V. 20. – P. 12906–12911.
7. Bolognesi G., Parisi D., Calonico D., Costanzo G.A., Levi F., Metz P.W., Krankel C., Huber G., Tonelli M. Yellow laser performance of  $Dy^{3+}$  in co-doped  $Dy,Tb:LiLuF_4$  // Opt. Lett. – 2014. – V. 39. – P. 6628–6631.
8. Xia Z., Yang F., Qiao L., Yan F. End pumped yellow laser performance of  $Dy^{3+}:ZnWO_4$  // Opt. Commun. – 2017. – V. 387. – P. 357–360.
9. Hu Z., Xu X., Wang J., Liu P., Li D., Wang X., Zhang J., Xu J., Tang D. Fabrication and spectral properties of  $Dy:Y_2O_3$  transparent ceramics // J. Eur. Ceram. Soc. – 2018. – V. 38. – P. 1981–1985.

УДК 53.082.5, 535.39

## РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МАКЕТА ПРИБОРА БЛЕСКОМЕРА

Беляева А.С.<sup>1</sup>, Романова Г.Э.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н., доцент Романова Г.Э.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрено проектирование прибора, предназначенного для контроля блеска лакокрасочных покрытий. Выполнено сравнение результатов линейности показаний предыдущей модели прибора Константа Б, полученных при калибровке во ВНИИОФИ, и прибора, оптическая и электронная часть которого были существенно переработаны.

**Ключевые слова:** блескомер, определение блеска покрытия, лакокрасочные материалы, углы измерения, линейность характеристики.

**Введение.** В условиях производства лакокрасочных покрытий свойства глянцевости принято измерять с помощью блескомера. Показатели глянцевости в единицах блеска поверхности измеряются на основании анализа сигнала, отраженного от поверхности, освещенной определенным образом.

В работе рассматривались вопросы совершенствования модели прибора. На первых этапах работы был выполнен анализ и расчет оптической части прибора. На данном этапе выполнено макетирование образца, а также проводилось тестирование прибора.

**Макет прибора.** На основе проведенного анализа и математического моделирования были уточнены требования к оптической части системы [1–4]. Вид разработанной конструкция крепления и общий вид корпуса показан на рис. 1. По результатам этого этапа работы внесены изменения в конструкцию для большей ее технологичности.

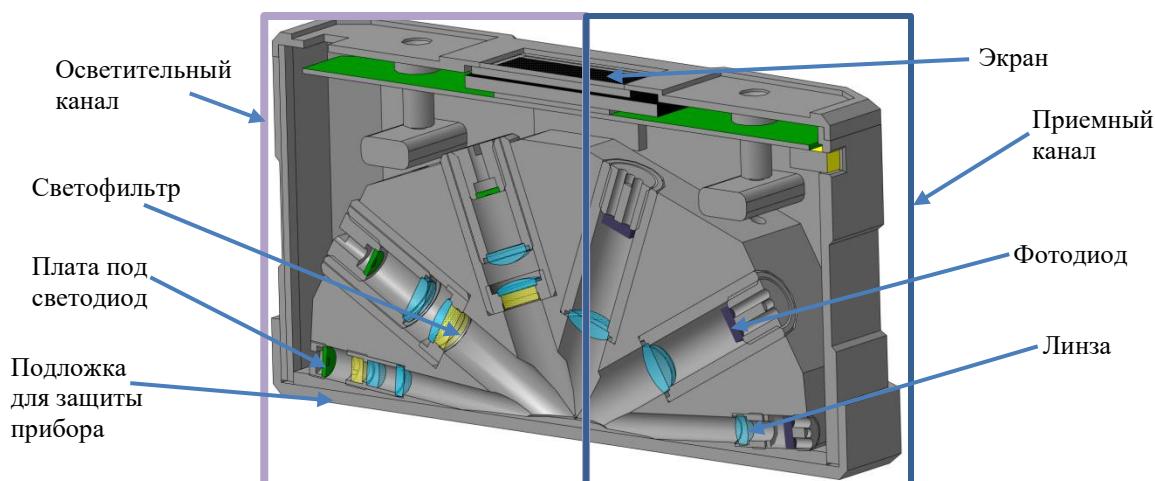


Рис. 1. 3D модель прибора

При проведении испытаний прибора первой версии было выявлена нелинейность показаний прибора: значения глянцевости нелинейно зависят от тока, вырабатываемого фотодиодом, что приводит к абсолютной границе погрешности измерений блеска до 19,3 ед. Была попытка «выпрямить» дугу программным путем, однако даже с учетом программных исправлений, график не становится линейным [5]. На рис. 2 приведены графики зависимости для нескольких каналов 45°/45°, 60°/60°, 20°/20°, 85°/85°. Линия тренда выбрана полиномиальной так как при программировании прибора была выбрана эта функция. К таким результатам может привести следующие факторы:

- неравномерная освещенность площадки;

- непараллельный пучок, падающий на контролируемую площадку;
- несогласованность характеристик фотодиод и светодиода;
- спектр источника отличается от типа А или С [6].

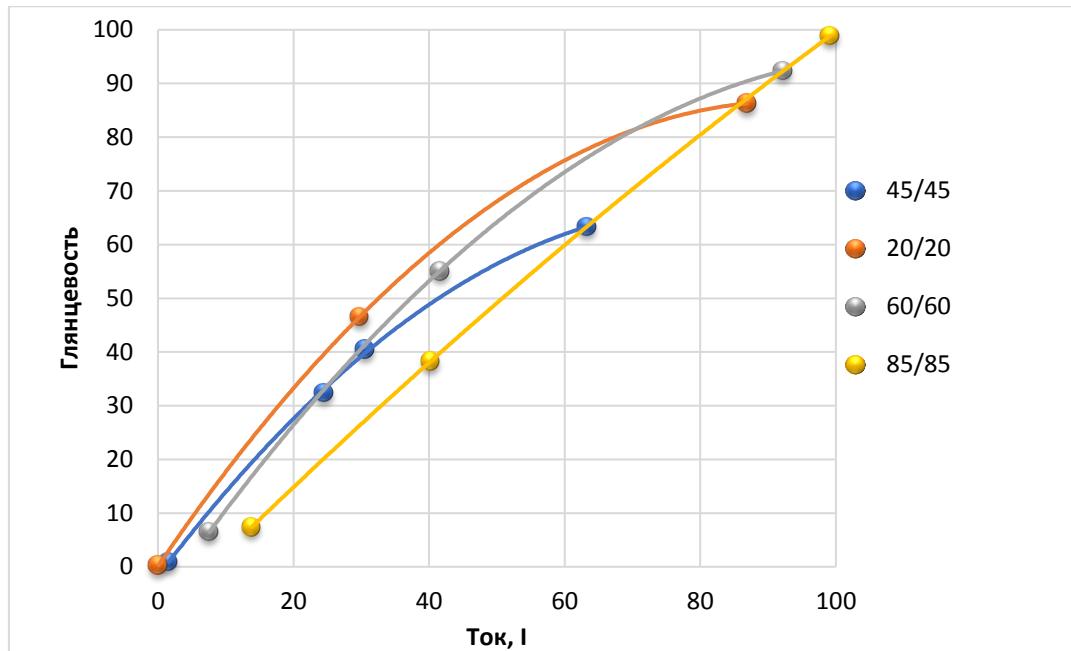


Рис. 2. График линейности показаний для прибора первой версии

**Корректирование спектра источника.** Как показал анализ недостатков предыдущей версии прибора, использование источника со спектром типа С позволит улучшить характеристики прибора. Если подходящего источника, создающего такой тип спектра, нет, то система должна иметь корректирующий светофильтр. Для изготовления такого фильтра необходимо знать спектр источника при рабочем токе. Были проведены измерения 10 светодиодов из одной партии при токе 0,1 А, вычислена усредненная спектральная кривая и по ней произведен расчет необходимой спектральной плотности излучения (рис. 3) и спектральное пропускание фильтра (рис. 4).



Рис. 3. Спектральная плотность излучения после светофильтра

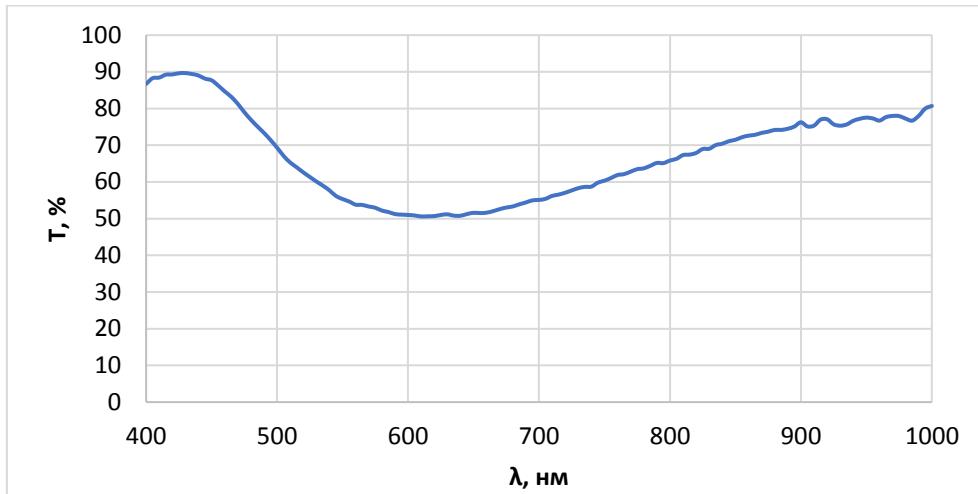


Рис. 4. График спектрального пропускания светофильтра

Также были выполнены замеры системы с готовым светофильтром, на основании этих данных подбирались светодиоды, которые соответствуют предельным отклонениям в соответствии с требованиями ГОСТ 7721-89.

**Тестирование прибора.** Для оценки точности работы прибора на текущем этапе работ были выполнены измерения на эталонных образцах блеска (рис. 5). При известных значениях блеска образцовых поверхностей и сигнала на выходе фотодиода можно построить график зависимости этих значений и сделать выводы о том, насколько линейной является характеристика разработанного прибора (рис. 6).



Рис. 5. Набор мер блеска, поверенных во ВНИИОФИ

Произвести измерения на всем диапазоне для угла 85/85 градусов нет возможности, так как нет поверенных эталонных образцов.

Сравнивая рис. 2 и 6, можно заметить, что графики стали более линейными. Стоит отметить, что на рис. 2 используется программное исправление нелинейности, на рис. 6 – графики приведены без использования программной коррекции нелинейности. Для того чтобы получить зависимость глянцевость-ток, необходимо произвести вычисления по следующей формуле:

$$I = \frac{(U_H - U_n)}{R},$$

где  $U_H$  – номинальное напряжение;  $U_n$  – полученное напряжение;  $R$  – заданное сопротивление.

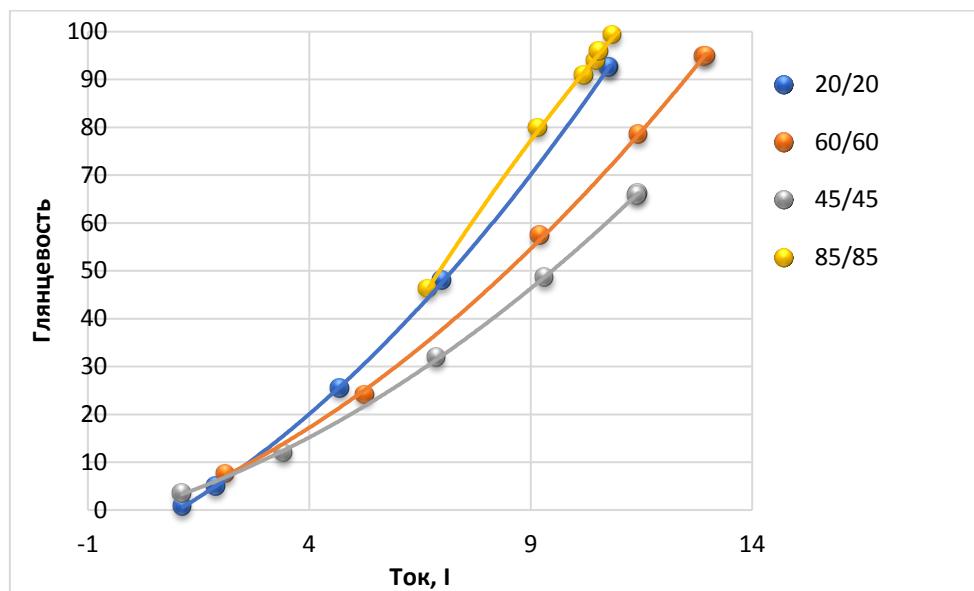


Рис. 6. График линейности результатов после изменения оптической системы

Помимо определения блеска по эталонам, были выполнены измерения на трех образцах яркости (рис. 7). По графику можно видеть, что функция яркости получились линейной.

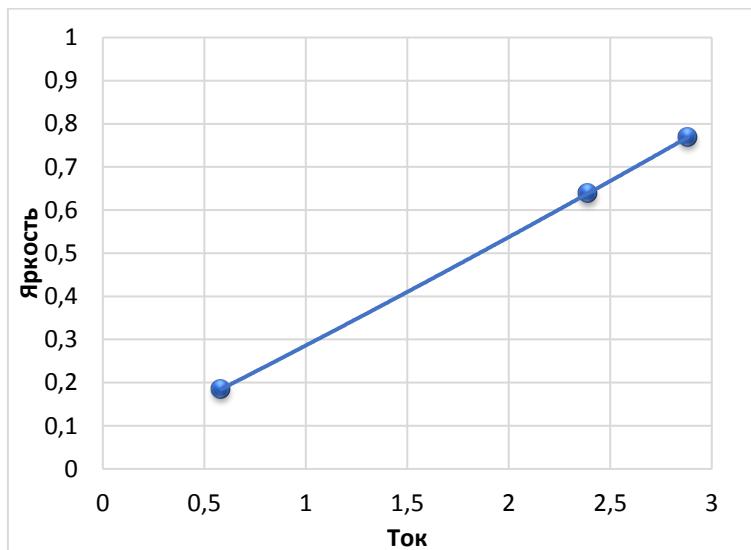


Рис. 7. График зависимости тока фотодиода от яркости поверхности для угла 45/0

**Заключение.** В работе выполнена сборка макета и тестирование прибора на эталонных образцах блеска и яркости. Измерения проводились для трех углов 20°, 45°, 60°, 85°, предназначенных для измерения глянцевости поверхности и для угла 45/0, предназначенного для измерения яркости. Были получены результаты зависимости блеска/яркости от тока на фотодиоде.

Результаты показали улучшение характеристик по сравнению с предыдущей версией прибора, остаточная нелинейность характеристики может быть исправлена программными методами.

## Литература

- ГОСТ 31975-2013 (ISO 2813:1994). Метод определения блеска лакокрасочных покрытий, не обладающих металлическим эффектом, под углом 20°, 60° и 85°. – Введен 01.08.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.

2. ZEMAX Optic Studio. User Manual. Version July 2018. – ZEMAX LLC, 2018. – 2545 p.
3. Латыев С.М. Конструирование точных оптических приборов. – СПб.: Изд-во «Лань», 2015. – 560 с.
4. ГОСТ 1807-75. Радиусы сферических поверхностей оптических деталей. Ряды числовых значений. – Введен 01.01.1977. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 18 с.
5. ГОСТ 896-69. Материалы лакокрасочные. Фотоэлектрический метод определения блеска. – Введен 01.01.1970. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 3 с.
6. ГОСТ 7721-89. Источники света для измерений цвета. Типы. Технические требования. Маркировка. – Введен 01.07.1990. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 19 с.

УДК 617-089.844, 535.662.13

**ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ ДЕНТАЛЬНЫХ  
ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТОВ НА ИХ ОСТЕОИНТЕГРАЦИЮ  
В ЖИВОМ ОРГАНИЗМЕ**

**Божко В.И.<sup>1</sup>**

**Научный руководитель – к.т.н. Одинцова Г.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Университет ИТМО

Известно, что структуры, сравниваемые с размером клеток, являются оптимальными для приживаемости биологических клеток. Было выбрано три типа микро- и наноразмерных структур (канавки, лунки, апериодические структуры), полученных путем наносекундной лазерной обработки. Полученные структуры нетоксичны и обладают высокой гидрофильностью. Кроме того, мезенхемальные стволовые клетки костного мозга человека культивируются и колонизируются на поверхности образцов. Представлен количественный и качественный анализ пролиферации и миграции клеток.

**Ключевые слова:** лазерное микро- и наноструктурирование титана, смачиваемость, исследование *in vitro*, применение в имплантологии.

**Введение.** В настоящее время титан и его сплавы являются наиболее популярными материалами для производства имплантатов. Оксид титана часто используется для повышения коррозионной стойкости имплантата [1]. Микрорельеф на поверхности титана положительно влияет на пролиферацию клеток [2]. Двухуровневый микро- и нанорельеф, изменяющий гидрофобную поверхность на гидрофильную, формируется для адгезии клеток и биологических жидкостей на ранних стадиях биоинтеграции [3]. Сочетание наноструктур на поверхности и гидрофильности поверхности приводит к самым высоким уровням адсорбции белка [4].

Существует несколько видов обработки поверхностей современных имплантатов, но именно лазерная обработка может производить наибольшее количество структур и, следовательно, является одним из наиболее перспективных методов структурирования имплантатов. Кроме того, лазерная обработка обеспечивает минимальное остаточное загрязнение обработанной поверхности имплантата и не требует каких-либо расходных материалов.

**Основная часть.** Для создания успешного имплантата необходима подходящая для клетки окружающая среда на поверхности (для адгезии и пролиферации): нетоксичная композиция и подходящая геометрическая структура. Ранее моими коллегами была выдвинута гипотеза о том, что размер структур на поверхности имплантата должен быть соизмерим с размерами биологических объектов, взаимодействующих с ним. Для проверки этой гипотезы было предложено провести исследования *in vitro*. В качестве клеток для исследования были использованы мезенхимальные стволовые клетки (hMSCs) человеческого костного мозга с размером ядра около 20–30 мкм. Но остается вопрос: какая форма структуры обеспечит лучшее выживание клеток?

Таким образом, для структурирования поверхности титана использовались лазерные режимы облучения, обеспечивающие нагрев до температур выше температуры кипения металла, что приводило к образованию упорядоченной микроструктуры по всей поверхности имплантата в виде канавчатой структуры, структуры, напоминающей упорядоченные лунки, и апериодической структуры с геометрическими параметрами, соответствующими размеру клеток hMSC. Параметры лазерного воздействия: для структуры канавки  $q=6,3 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>,  $Mx=15\%$ ,  $My=0\%$ ; для структуры лунок  $q=6,9 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>,  $Mx=0\%$ ,  $My=0\%$ ; для апериодической структуры  $q=2,7 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>,  $Mx=0\%$ ,  $My=10\%$ ; ( $q$  – плотность мощности;  $M$  – шаг сканирования

пятна). Поскольку обработка происходит на воздухе, одновременно с образованием микроструктуры, на поверхности образуется наношероховатость. Наношероховатость возникает при конденсации испаряемого металла с одновременным его окислением на воздухе. Изображения поверхности SEM показаны на рис. 1.

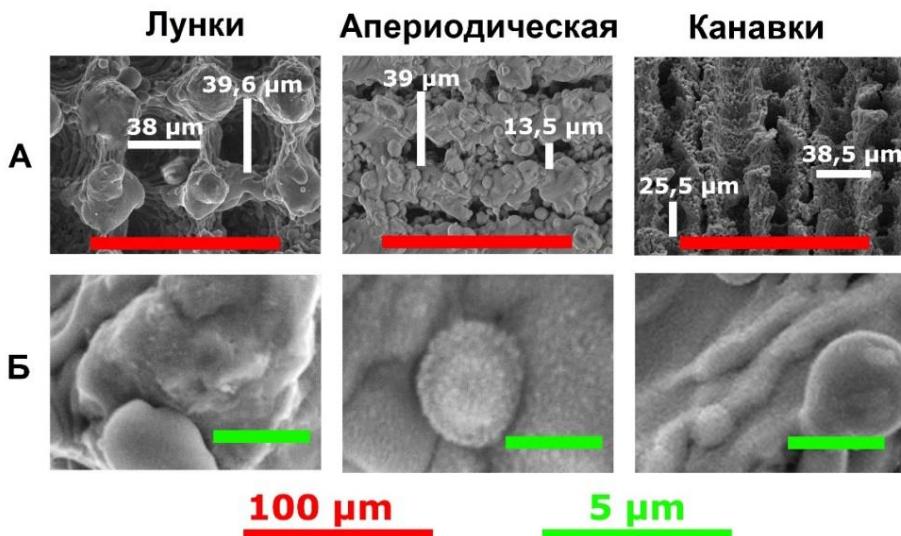


Рис. 1. СЭМ-изображения структур в двух масштабах x1000 (А) и x4000 (Б)

Кроме того, наношероховатость влияет на смачиваемость поверхности. Начальная поверхность была гидрофобной (угол контакта составлял  $110^\circ$ ). Лазерное структурирование привело к изменению смачиваемости поверхности от гидрофобной до гидрофильной. После попадания жидкости на структурированную поверхность капля не собирается в сферу, а мгновенно распространяется по ней (рис. 2). Таким образом, поверхность после лазерной обработки можно отнести к супергидрофильной.

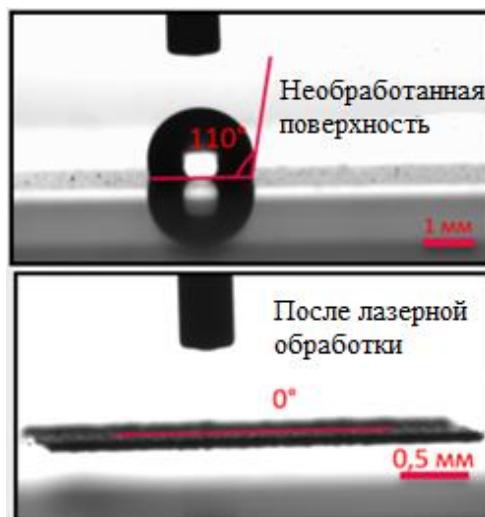


Рис. 2. Изображение изменения смачиваемости после лазерного структурирования

Три типа структур были подготовлены для испытаний *in vitro*. Геометрия структур сопоставима с размером hMSCs (размер ядра  $\sim 20\text{--}30$  мкм, длина хвоста  $\sim 100\text{--}150$  мкм). Рис. 3 иллюстрирует схематическое расположение клеток на разных поверхностях. Эти биосовместимые структуры имеют наношероховатость и супергидрофильны, что очень важно на ранних стадиях взаимодействия кости с имплантатом.

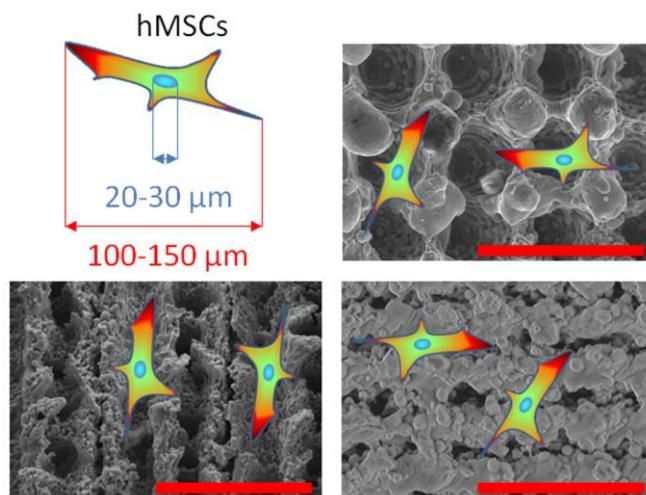


Рис. 3. Схематическое изображение в масштабе расположения ячеек на разных поверхностных архитектурах. Красная шкала составляет 100 мкм

Для сравнения результатов были проведены испытания *in vitro* на исходном полированном титане.

Через 24 ч отобранные клетки были обнаружены на всех типах образцов. Затем был проведен количественный и качественный анализ пролиферации клеток с помощью флуоресцентного красителя Turbo FP635 через 20 дней (рис. 4). Этот анализ показал увеличение количества клеток на поверхности структурированных образцов.

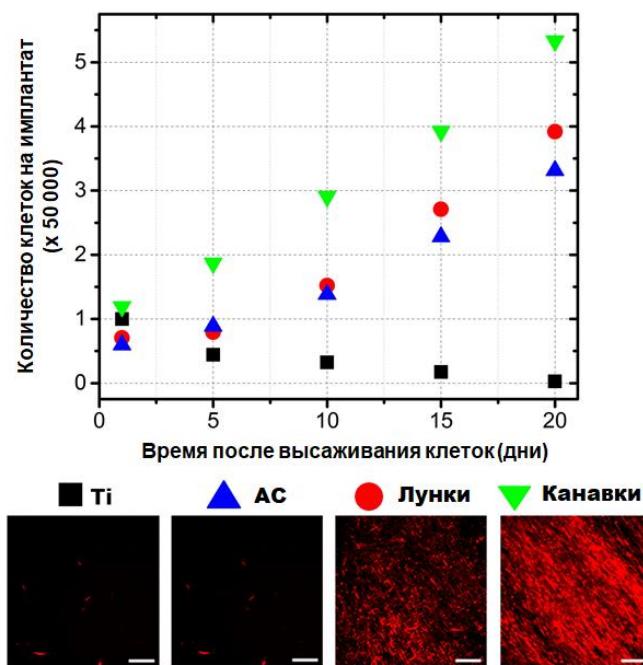


Рис. 4. Количественный (1–5–10–15–20) и качественный (через 20 дней) анализ пролиферации клеток на имплантатах с помощью флуоресцентного красителя Turbo FP635. Клетки – красная флуоресценция TurboFP635. Шкала масштаба составляет 300 мкм для всех изображений

Обычно неструктурированная поверхность Ti не оказывает значительного влияния на пролиферацию, а иногда даже уменьшает ее. Наибольшее распространение имеет образец со структурой канавок. Также результаты показали, что клетки расположены не только на поверхности, но также прорастают внутрь в открытые поры структур (рис. 5).

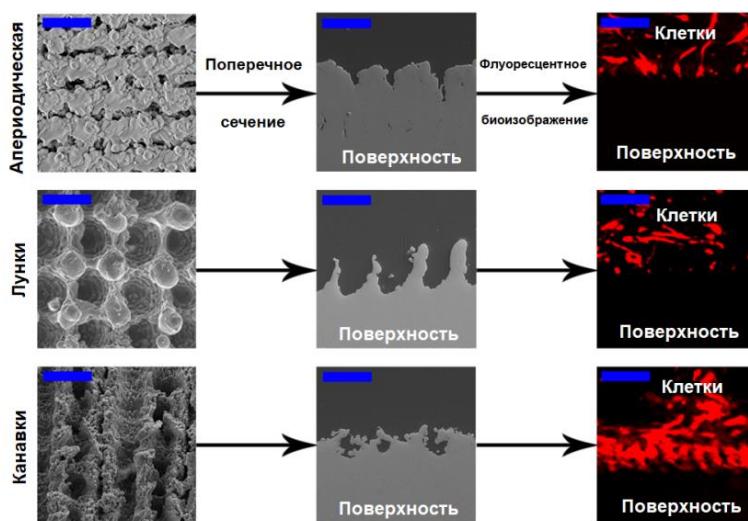


Рис. 5. Качественный анализ миграции клеток в имплантат с поверхности. SEM-изображения поверхностей, сечений и флуоресцентного биоизображения на 20 день.

Клетки – красная флуоресценция TurboFP635. Шкала (синяя) составляет 50 мкм для всех изображений

Хорошо видно, что в канавчатой структуре размножение клеток происходит наиболее интенсивно. Объяснение таких результатов может быть размер структурных элементов образца, сопоставимым с размером клеток, высаженных на структуры.

**Заключение.** Три различные структуры (лунки, апериодический рельеф и канавки) с одинаковыми микро- и наноразмерными частями обладают высокой гидрофильностью. Гидрофильность поверхностей имплантатов влияет на распространение адсорбции важных молекул и биологических жидкостей на ранних стадиях биointеграции.

HMSCs клетки успешно прикрепляются ко всем типам рельефов: лункам, апериодической структуре и канавкам, которые имеют характерный размер структур, сопоставимый с размером биологических объектов (клеток). Наилучшие результаты были получены с микро- и наноразмерной канавчатой структурой. Наношероховатость обеспечивает супергидрофильность поверхности; микромасштаб влияет на направление роста клеток. Рифленая поверхность способствует инициации процесса остеоинтеграции, поддерживая остеогенную дифференцировку клеток.

## Литература

1. Hizal F., Zhuk I., Sukhishvili S., Busscher H.J., van der Mei H.C., Choi C.H. Impact of 3D hierarchical nanostructures on the antibacterial efficacy of a bacteria-triggered self-defensive antibiotic coating // ACS applied materials & interfaces. – 2015. – V. 7. – № 36. – P. 20304–20313.
2. Zwahr C., Günther D., Brinkmann T., Gulow N., Oswald S., Grosse Holthaus M., Lasagni A.F. Laser surface patterning of titanium for improving the biological performance of dental implants // Advanced healthcare materials. – 2017. – V. 6. – № 3. – P. 1600858.
3. Raimbault O., Benayoun S., Anselme K., Mauclair C., Bourgade T., Kietzig A.M., Donnet C. The effects of femtosecond laser-textured Ti-6Al-4V on wettability and cell response // Materials Science and Engineering: C. – 2016. – V. 69. – P. 311–320.
4. Kopf B.S., Ruch S., Berner S., Spencer N.D., Maniura-Weber K. The role of nanostructures and hydrophilicity in osseointegration: In-vitro protein-adsorption and blood-interaction studies // Journal of biomedical materials research Part A. – 2015. – V. 103. – № 8. – P. 2661–2672.

УДК 535.92

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ И ВАКУУМА  
НА ИЗМЕНЕНИЕ Н-ПАРАМЕТРА АНИЗОТРОПНОГО ВОЛОКНА**

Болотов Д.К.<sup>1</sup>, Мухтубаев А.<sup>1</sup>, Шулепов В.А.<sup>1</sup>, Аксарин С.М.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Аксарин С.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены практические аспекты эксплуатации волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) в условиях различного атмосферного давления. Создан стенд для исследования зависимости изменения Н-параметра анизотропного волокна, от избыточного давления и вакуума. Проведен анализ полученных зависимостей для отрезка двулучепреломляющего волокна ESC-4, бескаркасного контура ВОГ и малогабаритной катушки ВОГ.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический гироскоп, анизотропное волокно, коэффициент экстинкции, *H*-параметр, оптическое волокно.

**Введение.** В наши дни наблюдается расширение сферы применения волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), вызванное их активным развитием и совершенствованием. К ВОГ, которые используются в аэрокосмической области, выдвигаются более жесткие эксплуатационные требования. Нахождение ВОГ в условиях различного атмосферного давления может непредсказуемым образом повлиять на точность его измерений. Поскольку значительное изменение величины Н-параметра может привести к фазовой ошибке в сигнале гироскопа, необходимым является исследование влияния внешнего давления на анизотропное волокно, как на ключевой элемент, и на всю конструкцию катушки ВОГ в целом.

Для исследования влияния изменения внешнего атмосферного давления на величину *H*-параметра волоконно-оптического контура ВОГ создан экспериментальный стенд (рис. 1). Экспериментальный стенд позволяет проводить исследовательские работы как в области повышенного давления, так и в области пониженного давления. Экспериментальный стенд состоит из широкополосного источника оптического излучения ThorLabs S5FC1005SXL с центральной длиной волны 1575 нм и полушириной спектра 45 нм, волоконно-оптического поляризатора, барокамеры и сканирующего поляризационного интерферометра Майкельсона с анализатором на входе для выделения обеих ортогональных поляризованных мод исследуемого образца, управление которым происходит с персонального компьютера.

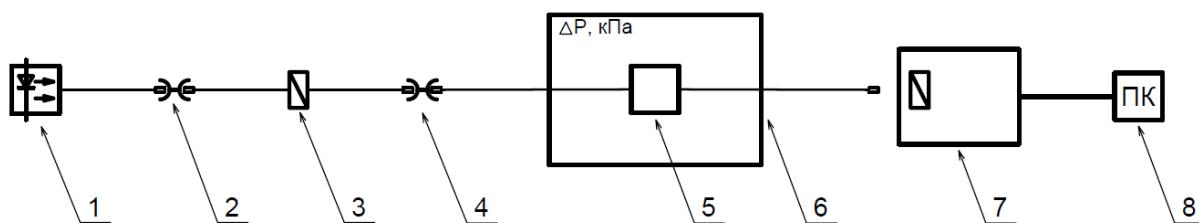


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования влияния изменения относительного давления на величину *H*-параметра: 1 – широкополосный источник оптического излучения; 2, 4 – оптическая розетка; 3 – волоконно-оптический поляризатор; 5 – исследуемый образец; 6 – барокамера; 7 – поляризационный интерферометр Майкельсона; 8 – персональный компьютер

Барокамера состоит из бака, в который помещается исследуемый объект, ресивера объемом 30 л, который используется для устойчивого поддержания давления в баке, вакуумного насоса Value V-I 240SV, компрессора Bamibi BB15V (рис. 2–4).

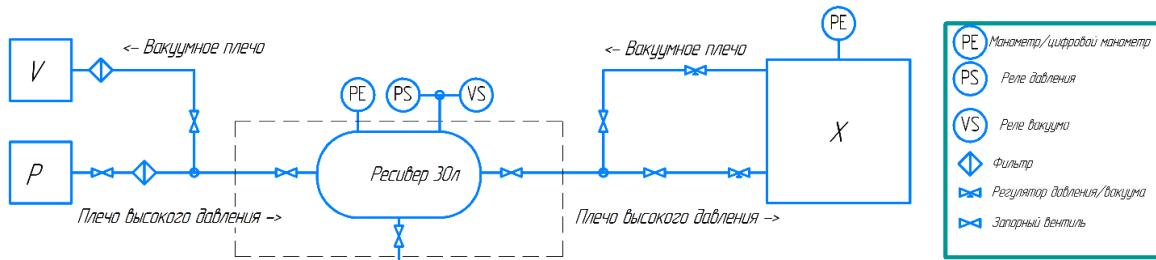


Рис. 2. Принципиальная схема барокамеры для изменения относительного давления:  
 $V$  – вакуумный насос;  $P$  – компрессор;  $X$  – бак

Исследуемый образец №1 – это отрезок двулучепреломляющего (ДЛП) оптического волокна ESC-4 длиной 10 м, свернутый в свободно лежащую смотку диаметром 140 мм. К обоим концам исследуемого объекта соосно были приварены линии задержки (отрезок ДЛП волокна ESC-4 из одной партии с исследуемым отрезком). Длина первой линии задержки 30 м, длина второй – 3 м.

Исследуемый образец №2 – это опытный образец бескаркасного волоконного контура ВОГ диаметром 180 мм, изготовленным из ДЛП волокна типа ESC-4 длиной около 640 м. Использовались специальный тип намотки – квадрупольный и пропитка компаундом RTV655.

Исследуемый образец №3 – малогабаритная катушка ВОГ.

**Методика исследования.** Для исследования влияния относительного давления на величину  $H$ -параметра ДЛП волокна, использовалась методика, основанная на применении широкополосной интерферометрии [1–4]. Линейно-поляризованное излучение от источника вводилось в исследуемый образец в одну из поляризационных осей. Анализатор на входе в интерферометр сориентирован к поляризационным осям образца под углом  $45^\circ$ . При сканировании исследуемого образца смещением зеркала поляризационного интерферометра Майкельсона на интерферограмме возникали интерференционные пики. По полученной интерферограмме, зная средний уровень интерференционной картины, определялась величина  $H$ -параметра по формуле [4]:

$$h = \frac{V_c^2}{L_d}, \quad (1)$$

где  $V_c$  – видность интерференционной картины;  $L_d$  – длина деполяризации исследуемого образца.

Значение длины деполяризации ДЛП волокна определялось как

$$L_d = \frac{\lambda B}{\Lambda \lambda}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – центральная длина волны источника оптического излучения (1560 нм);  $\Delta\lambda$  – ширина спектра источника оптического излучения (45 нм);  $B$  – длина биений ДЛП волокна (2,6 мм).

Для исследования влияния относительного давления на величину  $H$ -параметра ДЛП волокна ESC-4 (образец №1), изменение относительного давления происходило в два этапа (рис. 3, а): 1 – от относительного давления при нормальных условиях (н.у.) 0 кПа до +300 кПа с шагом 100 кПа, затем возвращение к н.у.; 2 – от относительного давления при н.у. 0 кПа до –80 кПа с шагом 20 кПа.

Для исследования влияния относительного давления на величину  $H$ -параметра бескаркасного контура ВОГ (образец №2), изменение относительного давления происходило в два этапа (рис. 3, б):

1. от относительного давления при н.у. 0 кПа до  $-60$  кПа с шагом 20 кПа, затем возвращение к н.у.;

2. от относительного давления при н.у. 0 кПа до +200 кПа с шагом 50 кПа.

Для исследования влияния относительного давления на величину  $H$ -параметра малогабаритной катушки ВОГ (образец №3), изменение относительного давления происходило в два этапа:

1. от относительного давления при н.у. 0 кПа до -80 кПа с шагом 20 кПа, затем возвращение к н.у.;

2. от относительного давления при н.у. 0 кПа до +300 кПа с шагом 50 кПа.

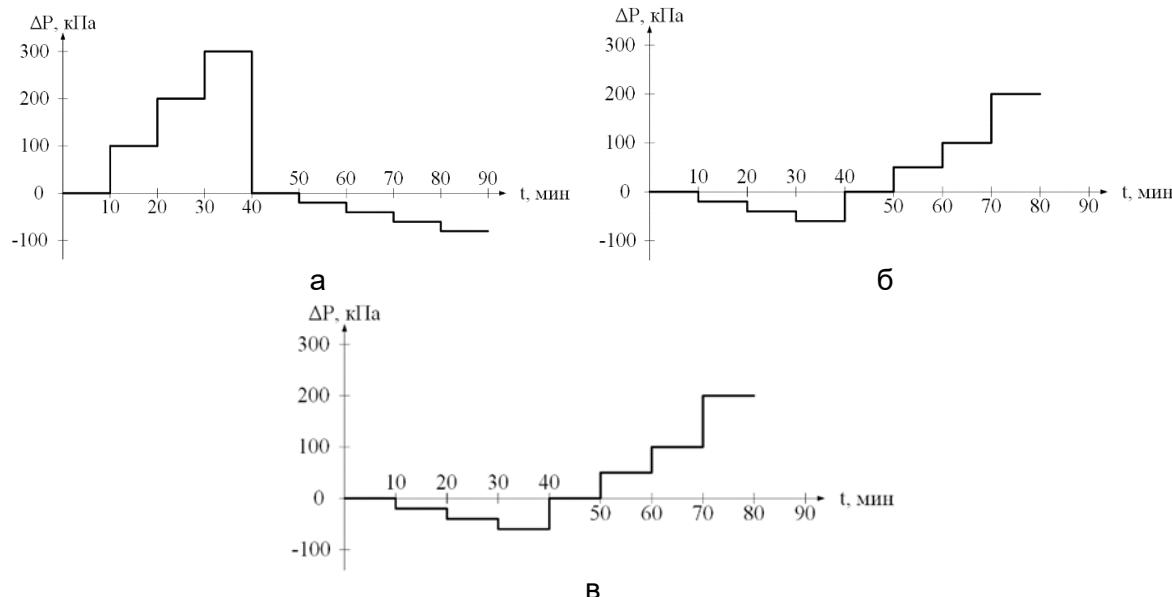


Рис. 3. Временная диаграмма изменения относительного давления:  
для образца №1 (а); для образца №2 (б); для образца №3 (в)

**Результаты исследования и выводы.** Ниже представлены полученные в ходе работы результаты исследования влияния изменения относительного давления на величину  $H$ -параметра ДЛП волокна ESC-4 (рис. 4). Величина  $H$ -параметра определялась на участке длиной 9 м с усреднением по 5 измерениям.

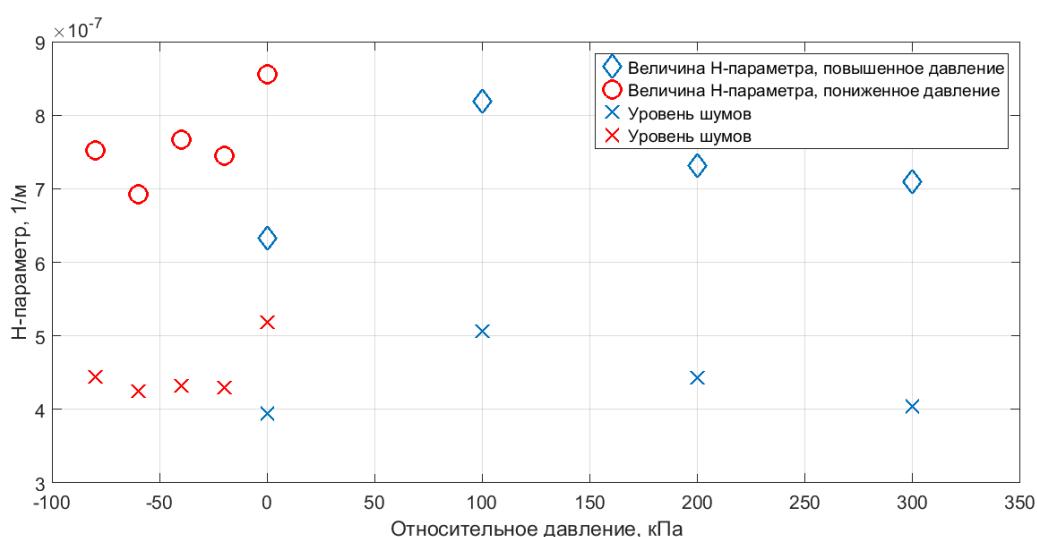


Рис. 4. Зависимость  $H$ -параметра ДЛП волокна ESC-4 от относительного давления

Из полученных результатов видно, что при изменении относительного давления в диапазоне от -80 кПа до +300 кПа изменение величины  $H$ -параметра незначительно (рис. 4).

Ниже представлены полученные в ходе работы результаты исследования влияния изменения относительного давления на величину  $H$ -параметра ДЛП волокна ESC-4 бескаркасного контура ВОГ (рис. 5). Величина  $H$ -параметра определялась на участке длиной 480 м.

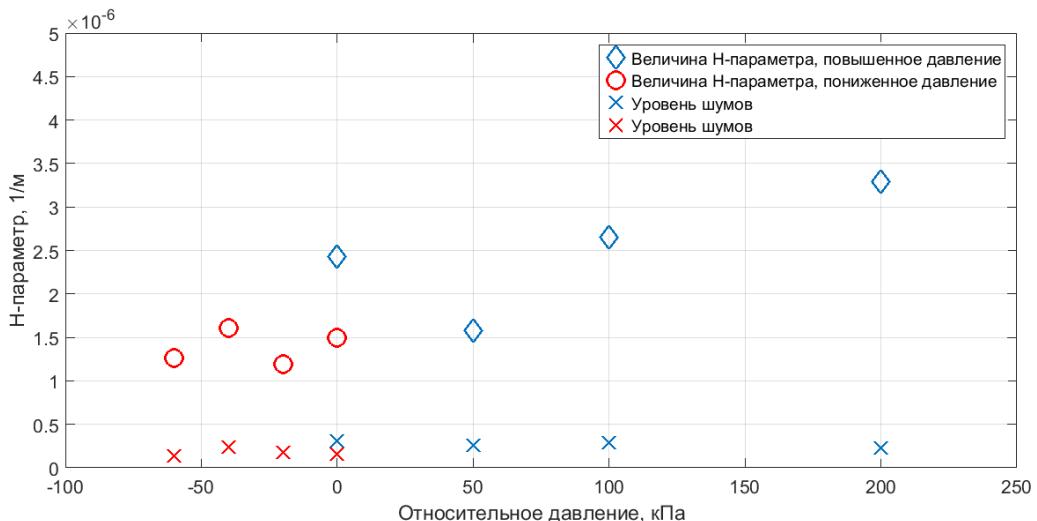


Рис. 5. Зависимость  $H$ -параметра ДЛП волокна ESC-4 бескаркасного контура ВОГ от относительного давления

Из полученных результатов видно, что при изменении относительного давления в диапазоне от  $-60$  кПа до  $0$  кПа изменение величины  $H$ -параметра ДЛП волокна ESC-4 бескаркасного волоконного контура ВОГ незначительное, но при изменении относительного давления в диапазоне от  $0$  кПа до  $+200$  кПа наблюдается рост величины  $H$ -параметра от  $2,43 \cdot 10^{-6} \text{ 1/m}$  до  $3,29 \cdot 10^{-6} \text{ 1/m}$ .

Изменение величины  $H$ -параметра ДЛП волокна ESC-4 бескаркасного волоконного контура ВОГ, вызванное изменением внешнего атмосферного давления, может приводить к возникновению фазовых ошибок в сигнале ВОГ. Однако в свободно уложенном ДЛП волокне ESC-4 изменение  $H$ -параметра незначительное. Можно сделать вывод, что в контуре ВОГ на изменение  $H$ -параметра при изменении внешнего атмосферного давления влияют конструктивные особенности контура: качество намотки оптического волокна, равномерность пропитки слоев компаундом, отсутствие воздушных полостей.

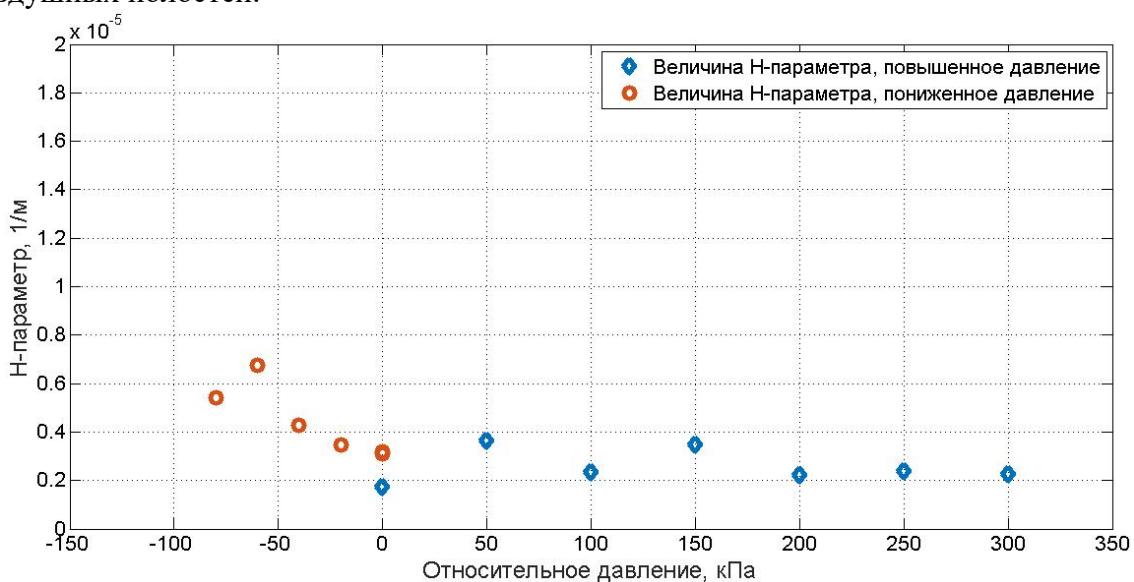


Рис. 6. Зависимость  $H$ -параметра ДЛП волокна ESC-4 малогабаритной катушки от относительного давления

Ниже представлены полученные в ходе работы результаты исследования влияния изменения относительного давления на величину  $H$ -параметра ДЛП волокна ESC-4 бескаркасного контура ВОГ (рис. 6). Величина  $H$ -параметра определялась на участке длиной 480 м.

Из полученных результатов видно, что в области пониженного давление происходит равномерное увеличение величины  $H$ -параметра. Можно предположить, что на увеличение влияют дефекты, допущенные при сборке катушки. Вероятно, что уменьшение количества воздушных полостей внутри катушки ВОГ, допущенных при сборке, может помочь уменьшить влияние давления на величину  $H$ -параметра.

### Литература

1. Аксарин С.М., Стригальев В.Е. Методика и аппарат исследования локальных преобразований в оптических волокнах с двулучепреломлением // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. – 2012. – Вып. 2. – С. 44–45.
2. Martin P., Le Boudec G., Lefevre H.C. Test apparatus of distributed polarization coupling in fiber gyro coils using white light interferometry // Proceedings of SPIE. – 1992. – V. 1585. – P. 173–179.
3. Zhihong Li, X. Steve Yao, Fellow, OSA, Xiaojun Chen, Hongxin Chen, Zhuo Meng, and Tiegen Liu. Complete characterization of polarization-maintaining fibers using distributed polarization analysis // Journal of Lightwave Technology. – 2015. – V. 33. – № 2. – P. 372–380.
4. Аксарин С.М. Исследование поляризационных методов и технологий согласования волоконно-оптических и интегрально-оптических волноводов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – СПб., 2014. – 116 с.

УДК 628.92/97

ИССЛЕДОВАНИЕ КАНАЛА СВЯЗИ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ  
ДАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ VLC ПРИ МОДУЛЯЦИИ ON-OFF KEYINGБородкин А.И.<sup>1</sup>, Гареев Э.З.<sup>1</sup>, Красавцев И.А.<sup>1</sup>, Полунина И.К.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Бугров В.Е.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (шифр 2017-14-582-0001-084, соглашение №14.581.21.0029 от 23.10.2017, уникальный идентификатор RFMEFI58117X0029).

В работе описана разработка прототипа модулятора для односторонней передачи данных по технологии VLC, описан разработанный алгоритм обработки передаваемого сигнала через оптический канал связи (КС) с типом модуляции потока излучения on-off keying. Проведены исследования созданного КС и получены зависимости скорости передачи данных от частоты модуляции при различных расстояниях. Проведены измерения светодиодного источника освещения и получены значения светового потока и фотометрическое тело источника.

**Ключевые слова:** visible light communication, оптический канал связи, беспроводная передача данных, on-off keying модуляция, модуляция потока излучения, источник излучения.

**Введение.** В последнее время технологии, позволяющие совмещать в привычных человеку вещах расширенный функционал, получают особое распространение. Такая тенденция не обошла стороной и системы внутреннего и наружного освещения, важной задачей которых, по мимо одноименного функционала, стала беспроводная передача данных посредством модуляции потока излучения. Так возникла инновационная технология беспроводной оптической передачи данных – Visible Light Communication (VLC). Технология VLC в качестве передатчика сигнала использует оптический элемент – светодиод, излучающий в видимом диапазоне длин волн, а в качестве приемника излучения используется оптический элемент, поглощающий излучение – фотоприемник. Принцип передачи сигнала такой системой основан на модуляции оптического излучения с частотой порядка нескольких кГц и выше. Человеческий глаз не способен воспринимать частоту мерцаний свыше 100 Гц, таким образом, для наблюдателя описанный принцип передачи информации будет незаметен, а осветительная система сможет сохранить свою основную функцию, совместив ее с функцией беспроводной передачи данных. Классическая модуляция светодиодного освещения основана на изменения светового потока излучения светильника – on-off keying. Именно на таком принципе модуляции и основано разрабатываемое устройство – модулятор, созданный для интеграции в уже существующие системы городского, промышленного и бытового освещения, без необходимости создания особых систем согласования и внедрения в существующие светильники дополнительных фотоприемников, и позволяющий, тем самым, расширить функционал таких систем, обеспечивая возможность для беспроводной передачи данных по каналу видимого излучения. Однако, для подобных системы, основанных на технологии VLC, крайне важным показателем их функциональности является скорость передачи данных, так как именно от этого показателя зависит объем полученной пользователем такой системы информации в кратчайшие сроки, кроме того, более высокая скорость передачи данных в таких системах позволяет реализовать более защищенные каналы связи (КС). Для односторонней передачи данных в качестве приемника излучения в системе может выступать матрица камеры мобильного устройства (МБУ), частота съемки которой, нередко, ограничена 100 Гц, необходимо использовать дополнительные методы в подобных системах, позволяющие повысить скорость передачи до нескольких десятков кГц [1–5].

**Решаемая проблема.** В рамках данной работы была поставлена задача в создании прототипа модулятора VLC, способного в дальнейшем обеспечить одностороннюю передачу данных со скоростью порядка нескольких кГц. Причем, в качестве источника сигнала должен быть использован прототип стандартного для офисных помещений светильника, излучающим модулем которого являются белые люминофоры светодиоды, в качестве приемника – матрица модуля камеры МБУ. Обработка и декодирование сигнала, при этом, должны также выполняться МБУ. Более того, прототип разрабатываемого программного комплекса должен предусматривать дальнейшую возможность создания визуального интерфейса пользователя для МБУ, с целью обеспечения возможности обработки полученных данных не техническим специалистом в данной области, а конечным пользователем МБУ. Основной проблемой при создании такой системы односторонней передачи данных является скорость, так как особенности работы модуля камеры МБУ не позволяют получить скорость равную нескольким кГц при считывании сигнала с матрицы камеры покадрово.

**Результаты.** Для решения поставленных задач были разработаны прототип и плата модулятора VLC, модель и электрическая схема которых представлены на рис. 1, соответственно. Разработанный прототип позволяет осуществлять on-off keying модуляцию с предельной скоростью до 1 МГц, что обусловлено особенностями реализации программного комплекса (ПК). Такое устройство рассчитано на работу с осветительным прибором мощностью до 43 Вт – значением номинальной мощности металл-оксид-полупроводник-транзистора (МОП-транзистор), являющимся элементом платы.

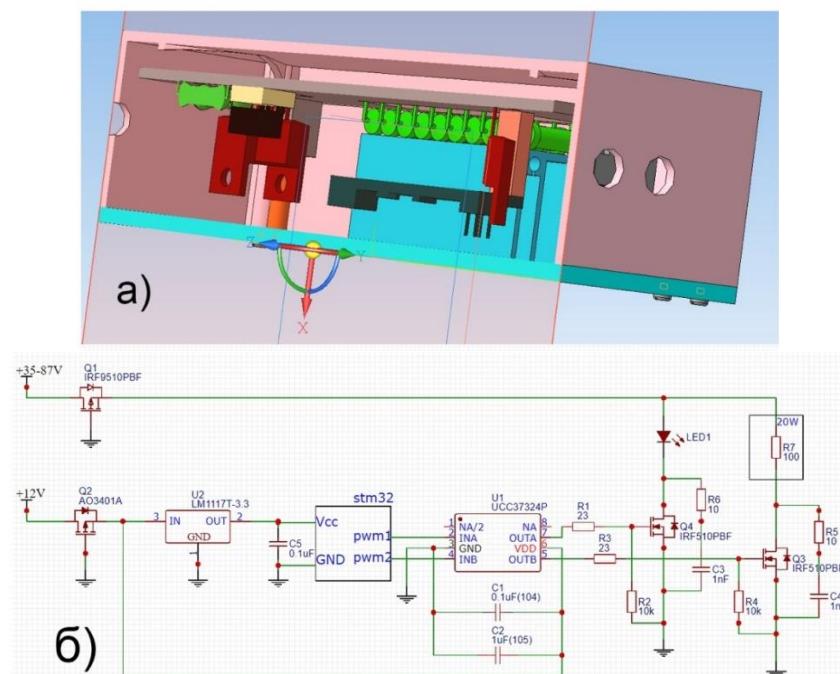


Рис. 1. 3D-модель прототипа модулятора в разрезе (а); электрическая схема платы модулятора (б)

Также был разработан ПК, сочетающий в себе программу управления разработанным модулятором, а также программу, предназначенную для МБУ, обеспечивающую обработку полученного сигнала модулем камеры МБУ (Клиентский ПК). Для повышения скорости считывания передаваемого сигнала с матрицы МБУ в Клиентском ПК был разработан алгоритм построчного считывания экспонирования с матрицы МБУ, основанный на эффекте скользящего затвора, который подробно описан группой авторов, под руководством Niranjini Rajagopal в [6], а также проиллюстрирован на рис. 2.

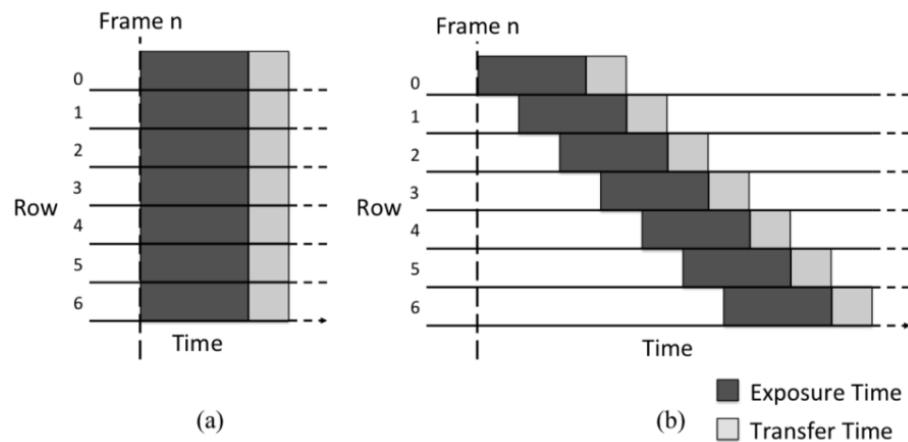


Рис. 2. Схематическое изображение принципа работы скользящего затвора МБУ [6]

Благодаря разработанному в рамках создания системы односторонней беспроводной передачи данных алгоритму считывания экспонирования матрицы МБУ при передаче сигнала модуляции излучения светильника, было получено увеличение скорости считывания передаваемого сигнала камерой МБУ на несколько порядков. Зависимость скорости считывания сигнала при использовании данного алгоритма может быть в упрощенном варианте описана выражением:

$$C = \frac{mN}{t},$$

где  $C$  – скорость считывания сигнала МБУ;  $m$  – количество отдельных независимых при экспонировании друг от друга сегментов матрицы МБУ (полос);  $N$  – количество обработанных кадров;  $t$  – время.

**Апробация результатов.** Для проведения измерений скорости передачи данных разработанной системой была проведена серия экспериментов в лабораторных условиях. Все измерения проводились в темной комнате, что позволило исключить влияние посторонних источников освещения на систему передачи данных, расположение компонентов системы, а также измерительного оборудования изображено на рис. 3, а. В качестве прототипа коммерческого светильника выступала разработанная плата излучающих светодиодов, имеющая поток 1680 лм и фотометрическое тело, изображенное на рис. 3, б. Все измерения изучающего модуля тестируемой системы передачи данных проводились на гониофотометре ФЛАКС.

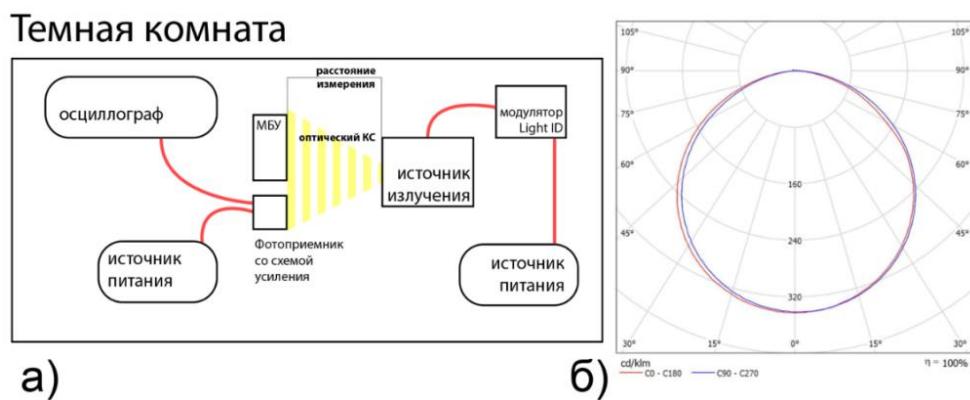


Рис. 3. Схематичное изображение расположения компонентов и оборудования при проведении измерений скорости в КС, при использовании модулятора VLC с излучающим модулем в качестве передатчика и матрицы камеры МБУ в качестве приемника (а); фотометрическое тело излучающего модуля, полученное при измерении кривых силы света на гониофотометре ФЛАКС (б)

В результате проведения измерений были получены три зависимости количества светлых и темных полос в одном обработанном кадре МБУ от частоты модуляции передаваемого сигнала на разных расстояниях, изображенные на рис. 4, а. При анализе полученных зависимостей становится видно, что при увеличении расстояния максимальная скорость передачи данных в системе значительно сокращается, что может быть обусловлено недостаточной яркостью излучения светильника принимающей матрицей МБУ для однозначного определение темных и светлых полос в пределах одного кадра, что видно на рис. 4, б, в. Однако, рис. 4, а демонстрирует успешную работу созданного алгоритма, который позволяет передать до 180 бит информации через оптический КС, при использовании в качестве приемника матрицы МБУ, в отличие от 1 бита информации, при экспонировании матрицы целиком.

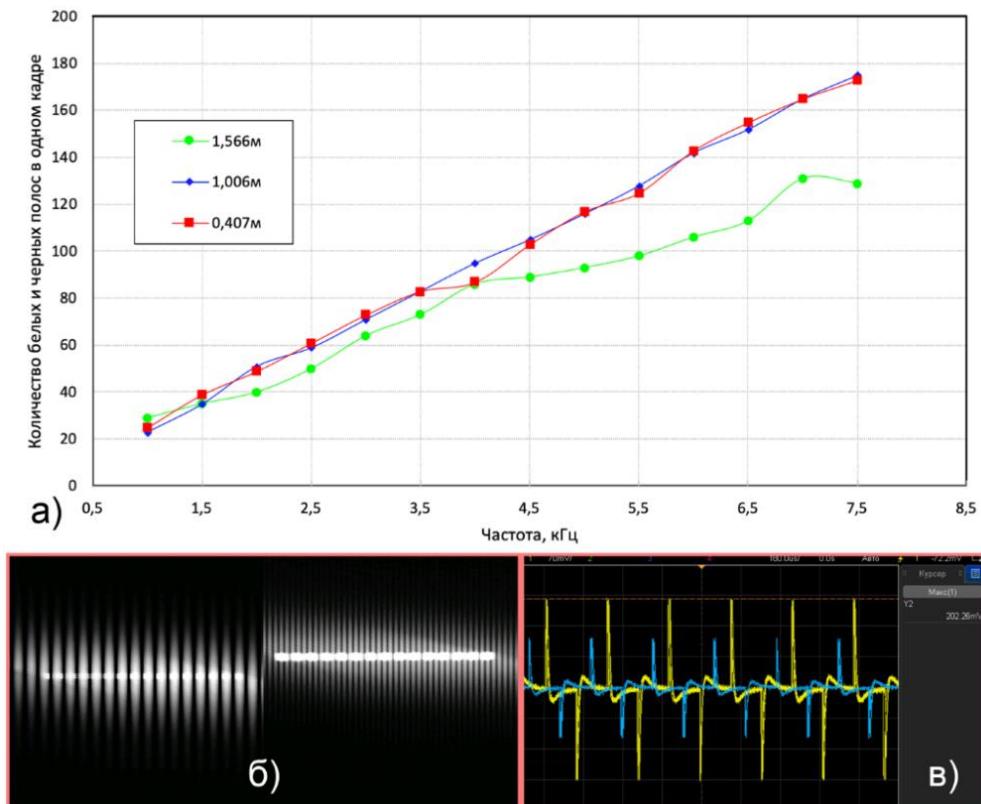


Рис. 4. Зависимость количества усредненных темных и светлых полос от частоты модуляции потока излучения источника излучения (а); скриншоты интерфейса МБУ, модуляция излучения источника при 3 кГц (слева), при 7,5 кГц (справа) (б); осциллограммы, полученные с помощью усилительной схемы и фотоприемника FDS-100, для 7,5 кГц при расстоянии 1,566 м (голубая) и 1,006 м (желтая) (в)

**Заключение.** В рамках данной работы был разработан прототип модулятора VLC, создан ПК, позволяющий осуществлять одностороннюю передачу данных через оптический КС, используя в качестве передатчика модулятор, а в качестве приемника камеру МБУ. Разработан алгоритм, позволяющий увеличить скорость передачи данных в оптическом беспроводном КС по технологии VLC на несколько порядков. Проведены исследования КС, а также получены зависимости скорости передачи данных от частоты для on-off keying модуляции.

Используя предложенный в работе алгоритм обработки изображения, можно значительно повысить скорость передачи данных в описанном канале, именно поэтому при дальнейших исследованиях будет проведен ряд экспериментов по измерению скорости в оптическом КС при повышении не только частоты модуляции потока излучения, но и при повышении частоты кадров МБУ, а также при изменении

кодировки передаваемого сигнала. Кроме того, будут проведены дополнительные исследования, отражающие зависимости скорости передачи данных от таких параметров системы, как чувствительность матрицы МБУ (iso) и взаиморасположение всех элементов системы передачи данных.

### Литература

1. Haas H. Wireless data from every light bulb [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ted.com/talks/harald\\_haas\\_wireless\\_data\\_from\\_every\\_light\\_bulb](http://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb), своб.
2. Johri R., Li-Fi, Complementary To Wi-Fi // 2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC). – 2016. – P. 15–19.
3. Sharma V., Rajput S., Sharma P.K. Light fidelity (Li-Fi): An effective solution for data transmission // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1715. – P. 020061-1–020061-6.
4. Al Abdulsalam N., Al Hajri R., Al Abri Z., Al Lawati Z., M. Bait-Suwailam M. Design and Implementation of a Vehicle to Vehicle Communication System Using Li-Fi Technology // International Conference on Information and Communication Technology Research. – 2015. – P. 136–139.
5. Lee H., Lin H., Wei Y., Wu H., Tsai H., Ching-Ju Lin K. RollingLight: Enabling Line-of-Sight Light-to-Camera Communications // MobiSys '15: Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. – 2015. – P. 167–180.
6. Rajagopal N., Lazik P., Rowe A. Visual Light Landmarks for Mobile Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://users.ece.cmu.edu/~agr/resources/publications/ipsn2014-vlc.pdf>, своб.

УДК 60:579.6

**ФУНГИЦИДНАЯ И БАКТЕРИЦИДНАЯ АКТИВНОСТЬ ГЕТЕРОТРОФНЫХ БАКТЕРИЙ ПРОТИВ ФИТОПАТОГЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ**Бунакова А.П.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.биол.н., доцент Пастухова Н.Д.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

Актуальным подходом к борьбе с фитопатогенами является использование биоудобрений, созданных на основе бактерий-антагонистов. В работе были исследованы некоторые штаммы гетеротрофных почвенных и ризосферных бактерий на их антагонистические свойства по отношению к патогенным микроорганизмам.

**Ключевые слова:** антагонизм, биоудобрения, гетеротрофные бактерии, фитопатогенный микроорганизм, фунгицидная активность, бактерицидная активность.

В настоящее время фитопатогенные грибы и бактерии являются причиной большого количества потерь в производстве сельскохозяйственных культур. Патогенные микроорганизмы производят гидролитические ферменты, растворяющие компоненты клеточных стенок, и токсичные метаболиты, разрушающие ткани растения [1]. Интенсивное применение химических агентов для борьбы с фитопатогенами может приводить к истощению запаса питательных веществ в почвах, снижению урожайности агрокультур, а также к загрязнению окружающей среды. Альтернативным подходом к защите растений является использование биоудобрений, разработанных на основе антагонистических микроорганизмов. Известно, что некоторые из почвенных, эпифитных и эндофитных бактерий проявляют антагонистическую активность по отношению к фитопатогенам, т.е. обладают способностью подавлять или убивать патогенные бактерии и микроскопические грибы, тем самым контролируя заболевания растений. Механизмы, обуславливающие антагонистическую активность бактерий, включают ингибицию патогена антибиотиками, токсинами и поверхностно-активными соединениями, выработку ферментов, разрушающих клеточные компоненты патогенных микроорганизмов, конкуренцию за места колонизации, питательные вещества и минералы [2]. В отличие от химических, удобрения, созданные на микробной основе, являются экологически чистыми, повышают урожайность растений и обладают более низкой стоимостью [3]. Поэтому актуальным вопросом сельскохозяйственной биотехнологии является поиск наиболее активных штаммов микроорганизмов для борьбы с фитопатогенами и использование их в качестве биоагентов для создания новых безопасных биопрепараторов.

В данной работе объектами исследования служили штаммы гетеротрофных почвенных и ризосферных бактерий: B4, W6, SNK1, SNK2, SNK2-1, SNK6, NK VI, NK9, Г3, 105700Т, NO9-2Е, SO9-3Е. Бактерии культивировали на жидкой среде ГПД (глюкозо-пептонной с дрожжевым экстрактом) при pH=7 в условиях аэрации в течение трех суток. У всех образцов определяли титр – количество колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 мл. В качестве тест-объектов для исследования фунгицидных свойств всех штаммов были использованы фитопатогенные грибы видов *Fusarium solani* и *Alternaria solani*, вызывающие заболевания у таких сельскохозяйственных культур как томат и картофель.

Для определения фунгицидной активности исследуемых штаммов бактерий использовали метод «колодцев». Суспензии конидий фитопатогенных грибов вносили в расплавленный и остуженный до 37–40°C картофельно-сахарозный агар. Соотношение объема суспензии к объему среды определяли после прямого подсчета клеток в камере Горяева. Рассчитанные значения составили: 1 мкл на 10 мл среды для *Alternaria solani* и 10 мкл на 10 мл среды для *Fusarium solani*. Среду с грибными

сусpenзиями перемешивали и разливали в чашки Петри. После застывания в каждой чашке фламбированным пробочным сверлом, проделывали по 4 колодца диаметром 10 мм. Затем 100 мкл бактериальной сусpenзии в концентрации до  $10^8$  кл/мл вносили в приготовленные колодцы. Инкубация происходила в течение 4 дней для *Alternaria solani* и в течение 6 дней для *Fusarium solani*. Антагонистический эффект проявлялся в угнетении роста грибных колоний и развития мицелия. Фунгицидную активность штаммов бактерий определяли как радиус зоны ингибиования роста патогенных грибов вокруг колодцев. Степень ингибиования различалась у разных штаммов и в зависимости от вида тест-объекта. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Фунгицидная активность исследуемых штаммов

Номер штамма	Грам-тип	Вид	Зона подавления роста, мм	
			<i>Alternaria solani</i>	<i>Fusarium solani</i>
Контроль			0	0
B4	Гр(+)	<i>Bacillus cereus</i> group	13,5	4,75
W6	Гр(+)	<i>Bacillus cereus</i> group	0	20,75
SNK1	Гр(-)	<i>Pseudomonas</i> sp.	5,75	3
SNK2	Гр(+)	<i>Bacillus polymyxa</i>	9,25	0
SNK2-1	Гр(+)	<i>Bacillus polymyxa</i>	3,5	6,5
SNK6	Гр(+)	<i>Arthrobacter ramosus</i>	17,75	5
NK VI	Гр(+)	<i>Bacillus cereus</i> group	0	6,75
NK9	Гр(-)	<i>Pseudomonas</i> sp.	4,5	8,25
Г3	Гр(-)	НО	34	18
105700T	Гр(+)	<i>Bacillus cereus</i> group	5,5	6,25
NO9-2E	Гр(-)	НО	7,75	0,5
SO9-E3	Гр(-)	НО	2	18,25

Обозначения: НО – не определено.

Анализ бактерицидной активности исследуемых штаммов проводили с помощью метода «агаровых блоков». В качестве тест-объектов использовали некоторые штаммы бактерий, являющихся патогенами растений, важных для сельского хозяйства: *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*, *Erwinia carotovora* 822, *Pseudomonas syringae* pv. *atrofaciens* P-88, *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* 6028. Штаммы предварительно высевали сплошным газоном на твердую среду ГПД и выращивали в течение суток при температуре 28°C. Из каждой чашки Петри стерильным пробочным сверлом вырезали агаровые блоки, диаметра 10 мм. Тестируемые культуры патогенных микроорганизмов высевали сплошным газоном на чашки Петри с картофельным агаром. Сверху на каждую чашку Петри раскладывали по 4 блока с проверяемыми культурами. Инкубацию проводили при температуре 28°C в течение 4 суток. Присутствие антагонистической активности определялось по наличию зон ингибиования роста фитопатогенных бактерий вокруг агаровых блоков. Радиусы зон подавления были измерены и сведены в табл. 2.

Нами было показано, что штаммы SNK2, SNK2-1 проявляли антагонистическую активность к патогенным штаммам *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* и *Erwinia carotovora* 822. Штаммы NK VI и NK9 – к *Pseudomonas syringae* pv. *atrofaciens* P-88. Рост бактерии *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* 6028 подавлял штамм NK VI.

Таблица 2. Бактерицидная активность исследуемых штаммов

Номер штамма	Грам-тип	Вид	Зона подавления роста, мм			
			<i>Ps. syringae</i> pv. <i>tomato</i>	<i>Erwinia</i> <i>carotovora</i> 822	<i>Ps. syringae</i> pv. <i>Atrofaciens</i> P-88	<i>Cl.</i> <i>michiganensis</i> <i>subsp.</i> <i>sepedonicus</i> 6028
Контроль			0	0	0	0
B4	Гр(+)	<i>Bacillus cereus</i> group	0	0	0	0
W6	Гр(+)	<i>Bacillus cereus</i> group	0	0	0	0
SNK1	Гр(–)	<i>Pseudomonas</i> sp.	0	0	0	0
SNK2	Гр(+)	<i>Bacillus polymyxa</i>	4	3,5	0	0
SNK2-1	Гр(+)	<i>Bacillus polymyxa</i>	3,5	1,5	0	0
SNK6	Гр(+)	<i>Arthrobacter ramosus</i>	0	0	0	0
NK VI	Гр(+)	<i>Bacillus cereus</i> group	0	0	2,5	1,5
NK9	Гр(–)	<i>Pseudomonas</i> sp.	0	0	1,75	0
Г3	Гр(–)	НО	0	0	0	0
105700Т	Гр(+)	<i>Bacillus cereus</i> group	0	0	0	0
NO9-2E	Гр(–)	НО	0	0	0	0
SO9-E3	Гр(–)	НО	0	0	0	0

Обозначения: НО – не определено.

Таким образом, в результате исследования были экспериментально отобраны штаммы гетеротрофных почвенных и ризосферных бактерий, проявляющие выраженное антагонистическое действие по отношению к фитопатогенным грибам видов *Alternaria solani* и *Fusarium solani* и бактериям видов *Pseudomonas syringae*, *Erwinia carotovora*, *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus*. Отобранные штаммы являются наиболее перспективными для дальнейшего изучения и тестирования, и создания на их основе биоудобрений.

### Литература

1. Durairaj K., Velmurugan P., Park J.H. et al. Potential for plant biocontrol activity of isolated *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus stratosphericus* strains against bacterial pathogens acting through both induced plant resistance and direct antagonism // FEMS Microbiology Letters. – 2017. – V. 364. – № 23. – P. 1–8.
2. Winding A., Binnerup S.J., Pritchard H. Non-target effects of bacterial biological control agents suppressing root pathogenic fungi // FEMS Microbiology Ecology. – 2004. – V. 47. – № 2. – P. 129–141.
3. Olanrewaju O.S., Glick B.R., Babalola O.O. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria // World journal of microbiology and biotechnology. – 2017. – V. 33. – № 11. – P. 197–213.

УДК 53.083.9

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ ОБЪЕКТИВА ЗВЕЗДНОГО  
ДАТЧИКАВиноградов М.Р.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н., доцент Цыганок Е.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе приведены результаты расчета объектива для звездного датчика, согласно техническому заданию, а также методика контроля основных характеристик объектива.

**Ключевые слова:** методика контроля, звездный датчик, объектив, светосильные объективы, астрономические объективы.

**Введение.** Звездные датчики стремительно набирают популярность в области космического приборостроения, выполняя роль навигаторов у средних и малых спутников. Они представляют собой систему из объектива, приемника излучения и вычислительный центр, в базе которого содержится звездный каталог. Принцип работы звездного датчика следующий: изображение пространства перед спутником, построенное на приемнике, сравнивается с подключенной базой данных, после чего бортовой компьютер вычисляет ориентацию спутника относительно известных небесных тел. Проблема использования звездных датчиков заключается в том, что невозможно обеспечить нулевую угловую скорость спутника, и, следовательно, остаточные скорости в условиях космоса будут уводить космический аппарат от заданной ориентации. Звездные датчики отличаются своей компактностью и малой массой, что играет важную роль для космических аппаратов.

**Проектирование объектива звездного датчика.** В ходе проведения работы был проведен расчет и изготовление опытного образца объектива для звездного датчика. С учетом особенностей условий работы прибора (а именно – открытый космос), техническое задание на изготовление объектива включает в себя требование к обеспечению следующих характеристик системы:

- фокусное расстояние:  $f' = (32 \pm 0,6)$  мм;
- угловое поле в пространстве предметов:  $2\omega = 20^\circ \pm 5'$ ;
- относительное отверстие:  $D/f' = 1:1,7$ ;
- рабочий спектральный диапазон: (404,7–900) нм;
- задний отрезок:  $S'_{F'} = (16 \pm 1)$  мм;
- критерии качества конечной системы: для осевой точки размер пятна для 80% энергии должен составлять 30 мкм;
- виброустойчивость: объектив должен сохранять свои характеристики после воздействия вибрации частотой 25 Гц, ускорением 2g в течение 10 мин по трем взаимно-перпендикулярным осям;
- габаритные размеры корпуса: (54×54×54) мм;
- масса системы не должна превышать 120 г.

Спроектированный в соответствии с вышеизложенными требованиями объектив имеет конструктивные параметры, представленные в таблице. Ход лучей внутри системы изображен на рисунке.

Впоследствии перечисленные характеристики из Технического задания необходимо проконтролировать, выполнив соответствующие проверки опытного образца, изготовленного по рассчитанной при проведении работы схеме.

Таблица. Конструктивные параметры объектива

№ поверхности	Радиус	Осьное расстояние	Материал	Диаметр
1	42,46	2,7	Ф104	9,6
2	271,6	0,5	Воздух	9,6
3	31,05	6	ЛК103	9,6
4	-22,08	1	Ф104	9,6
5	43,05	14,8	Воздух	9,6
6	-895,4	3,6	Ф104	10,8
7	-28,18	0	Воздух	10,8
8	21,48	5,6	ЛК103	9,8
9	-21,48	1	Ф104	9,8
10	59,70			9,8

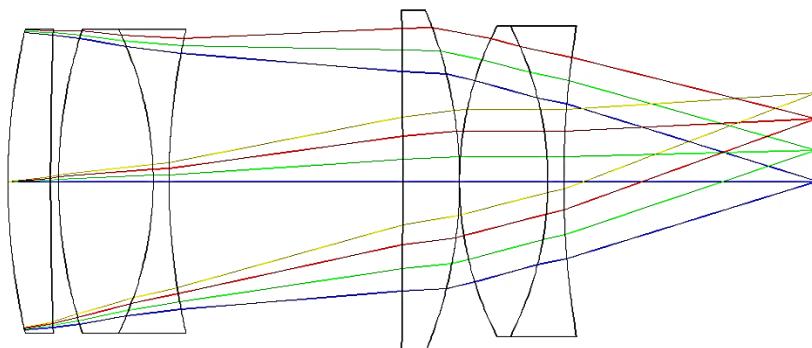


Рисунок. Ход лучей в системе

### Контроль параметров системы

1. Фокусное расстояние. Согласно ГОСТ 13095-82, фокусное расстояние должно быть измерено методом увеличения. Измерительная схема состоит из элементов со следующими параметрами:

- коллиматор,  $D = 22,5$  мм,  $f' = 225$  мм,  $A = 0,058$ ;
- микроскоп,  $A = 0,45$ ,  $\Gamma = 180^\circ$ ,  $D' = 0,98$ ;
- мира (согласно ГОСТ 15114-78, была подобрана мира №3 [1]);
- светофильтр.

Измерение фокусного расстояния производится по пункту 1.2.1 ГОСТ 13095-82 [2]. В начале измерений микроскоп фокусируется на резкое изображение, построенное объективом. При помощи окуляр-микрометра совмещают перекрестья микроскопа и штрихи миры. Наводятся на край полученного изображения и снимают показания с помощью окуляр-микрометра. Далее наводятся на противоположный край изображения. Итогом измерений будет определение размера изображения.

2. Поле в пространстве предметов. Чтобы измерить поле зрения объектива необходимо составить установку, включающую в себя миру, коллиматор, суппорт со шкалой, микроскоп, шкалу, центрированные на оптической скамье. Методика измерения углового поля следующая:

- ось вращения суппорта необходимо поместить в узловой точке объектива, для достижения полноценных измерений;
- объектив отклоняют на определенный угол, измеряемый шкалой суппорта;
- микроскоп наводится на изображение миры путем смещения поперечных наводок.

Итогом данного исследования является определения угла, отвечающего требованием качества технического задания для внеосевых точек [3].

3. Диаметр входного зрачка. Согласно ГОСТ 20828-81 [4] измерение диаметра входного зрачка объектива включает в себя следующие шаги:
- объектив устанавливается на предметный столик;
  - микроскоп фокусируется на край входного зрачка, снимаются измерения;
  - далее перекрестья микроскопа наводятся на диаметрально противоположную точку края зрачка, снимаются результаты измерений.

Диаметр входного зрачка – это разность между измерениями, его противоположных точек. Микроскоп для измерений выбирается по ГОСТ 8074-71\* или по ГОСТ 14968-69, если принято решение использовать универсальный измерительный микроскоп.

4. Рабочий спектральный диапазон. Структурная схема установки для измерения спектрального диапазона включает в себя коллиматор и приемник оптического излучения. Важным моментом является подбор приемника: так как требуемый рабочий спектральный интервал выходит за границы видимого излучения, для измерения пятна рассеяния необходим приемник, регистрирующий длины волн в диапазоне (404,7–900) нм. Так же стоит напомнить, что  $A_{\text{коллиматора}} \geq A_{\text{объектива}}$ .

Методика контроля спектрального диапазона объектива следующая:

- источник света устанавливается в заднюю фокальную плоскость коллиматора;
- объектив устанавливают после коллиматора, чтобы в него входил параллельный пучок лучей;
- приемник излучения устанавливают в фокусе исследуемого объектива.

Попадающее на приемник изображение, являющееся пятном рассеяния, регистрируется с помощью программы обработки сигнала.

5. Задний отрезок. Согласно ГОСТ 13096-82 п. 3.2, чтобы измерить задний отрезок выпущенного объектива требуется стеклянная пластина, а также отсчетная шкала [5]. Шаги измерения следующие:

- зеркало закрепляется на торце объективодержателя;
- микроскоп фокусируется на поверхность зеркала;
- по шкале снимаются результаты;
- объектив помещается в объективодержатель;
- микроскоп наводится на резкое изображение;
- снимается отсчет;
- микроскоп фокусируется на крайнюю оптическую поверхность исследуемого объектива.

Интересный момент выполнения последнего шага состоит в том, что саму поверхность объектива не видно, на нее нужно подышать, т.е. фокусировка производится на капельки влаги.

6. Масса объектива. Для измерения массы объектива предлагается использовать калиброванные весы среднего класса точности: объектив помещается на платформу весов, масса объектива определяется из показаний электронного табло [6].

7. Габаритные размеры корпуса. Для измерения габаритов объектива традиционно используется электронный штангенциркуль.

**Заключение.** В ходе работы была разработана оптическая схема объектива звездного датчика, соответствующая требованиям, изложенным в Техническом задании. Была разработана методика измерений характеристик объектива, основанная на соответствующих ГОСТ, по которой и проводился контроль объектива. Контролировать объектив необходимо дважды: после изготовления и после виброиспытаний, которым узел подвергался согласно Техническому заданию. Все этапы испытаний проводились троекратно. Результаты измерений были подобны друг

другу, из чего можно сделать вывод об успешности прохождения объективом испытания на виброустойчивость. Также на основании результатов измерений можно утверждать, что объектив звездного датчика отвечает требованиям, предъявленных в Техническом задании.

### **Литература**

1. ГОСТ 15114-78. Системы телескопические оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения. – Введен 01.01.1979. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – 6 с.
2. ГОСТ 13095-82. Объективы. Методы измерения фокусного расстояния. – Введен 01.01.1984. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 11 с.
3. Демин В.В., Половцев И.Г., Симонова Г.В. Оптические измерения. – Изд. дом ТГУ, 2014. – Т. 1. – 580 с.
4. ГОСТ 20828-81. Объективы. Методы измерения диаметра входного зрачка. – Введен 01.01.1982. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 10 с.
5. ГОСТ 13096-82. Объективы. Методы измерения рабочего и заднего фокального отрезков. – Введен 01.01.1984. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 11 с.
6. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2015. – 560 с.

УДК 537.312.52:544.537

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМОЙ  
ФАЗОВОЙ ПЛАСТИНЫ ИЗ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩЕГО  
ОДНООСНОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ГАУССОВА ПУЧКА В КОЛЬЦЕВОЙ**

Вихрова Е.Ю.<sup>1</sup>, Костюк Г.К.<sup>1</sup>, Сергеев М.М.<sup>1</sup>, Шкуратова В.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.т.н. Костюк Г.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе представлена фазовая пластина для преобразования линейно-поляризованного Гауссова пучка в кольцевой. Фазовая пластина была изготовлена технологией обработки, лазерно-индуцированной микроплазмой на пластине из исландского шпата, кристаллическая ось которой была ориентирована параллельно поверхности пластины (У-срез). Тестирование изготовленной фазовой пластины проводилось в двух схемах, одна из которых была схемой получения уменьшенного изображения кольцевого распределения интенсивности, другая – схема острой фокусировки полученного кольцевого распределения интенсивности.

**Ключевые слова:** фазовая пластина, лазерно-индуцированная микроплазма, кольцевое распределение интенсивности, исландский шпат, острая фокусировка.

**Введение.** Тенденция к миниатюризации элементов и систем в фотонике [1], высокоразрешающей микроскопии [2], микроаналитике для медико-биологического направления [3], а также повышение требований к условиям их работы, становятся причиной поиска оптимальных очертаний лазерных пучков и повышения их качества в технологиях изготовления подобных устройств. Также известно, что для большинства технологий лазерной микрообработки более эффективным является применение пучков с нулевой интенсивностью на оптической оси, так называемых кольцевых пучков [4]. Такие лазерные пучки можно получить с использованием различных оптических элементов, размещаемых внутри резонатора, или вне его [5]. Во многих случаях, например, при использовании мощных волоконных, полупроводниковых, дисковых лазеров, волноводных CO<sub>2</sub> лазеров, размещение оптических элементов вне резонатора является единственно возможным. Именно эти типы лазерных источников все чаще применяются в автоматизированных комплексах. Поэтому предпочтение исследователей в области лазерных технологий отдается внерезонаторным методам получения кольцевых пучков.

Одним из сравнительно простых оптических элементов, позволяющих преобразовать линейно-поляризованный Гауссов пучок в кольцевой, являются фазовые пластины (ФП) различной конфигурации. Начиная с первых классических работ [6, 7], посвященных описанию принципа их работы, подчеркивалось, что ФП способны преобразовывать и циркулярно-поляризованный Гауссов пучок в кольцевой. Принцип работы ФП, выполненной на аморфном материале, заключается в создании разности фаз в  $\pi$  радиан в разных частях пучка, прошедших через ФП. Как результат, в области фокусировки пучка между этими частями происходит деструктивная интерференция. В одном из вариантов конструкции ФП, описанной в работе [8], для создания кольцевого пучка, были использованы две области, толщина одной из них – центральной, в форме круга, превышала толщину вытравленной области в форме кольца, опоясывающего круг, на  $h$ :

$$n = \frac{\lambda}{2(n-1)}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения;  $n$  – показатель преломления материала пластины.

Описание работы данной пластинки было выполнено в рамках скалярной теории дифракции света. Однако, в этой же работе и в ряде других работ [9, 10] было показано,

что описание работы ФП любой конфигурации в случае применения для фокусировки объектива с высокой числовой апертурой ( $NA \geq 0,9$ ), следует применять векторную теорию дифракции света, в которой, в отличие от скалярной, необходимо учитывать роль ортогональных компонент векторов электромагнитного поля.

При рассмотрении принципов работы элементов и устройств, преобразующих линейно-поляризованный Гауссов пучок в кольцевой и вихревой, особое внимание уделяется созданию оптических элементов для преобразования Гауссовых пучков в кольцевые на пластинах из двулучепреломляющих одноосных кристаллов [11, 12]. Наиболее важными становятся возможные области их применения, часто относящиеся к таким высокотехнологическим направлениям, как охлаждение нейтральных атомов, оптический захват и управление металлическими, диэлектрическими и биологическими частицами нано- и микрометрового размера в отсутствии тепловых эффектов [13, 14]. Здесь наиболее важным параметром является предельно высокое разрешение в области перетяжки лазерного пучка. О применении ФП специальной конфигурации, выполненной на кристаллическом кварце в сверхразрешающей микроскопии (СВМ) для обеспечения резкой границы, ограничивающей центральное темное пятно подавляющего пучка, сообщается в работе [15]. Суть этой работы заключается в следующем. Известно, что флуоресцентное подавление в СВМ может обеспечить пространственное разрешение, превосходящее дифракционный предел. Это достигается при совместной фокусировке на окрашенный образец пучка подавления с кольцевым очертанием в темное пятно и Гауссова пучка возбуждения. Деструктивная интерференция при создании темного пятна циркулярно-поляризованного пучка подавления с кольцевым очертанием достигается при использовании  $\pi$ РР пластины.  $\pi$ РР пластина, реализованная в работе [15], состояла из внутренней области в форме круга и внешней области в форме кольца, охватывающей круг, и была выполнена из одного материала - кристаллического кварца одинаковой толщины. Быстрые оси внешней и внутренней областей при изготовлении  $\pi$ РР были ориентированы перпендикулярно, а выбор толщины  $\pi$ РР обеспечивал сдвиг фазы в  $\pi$  между направлениями медленной и быстрой осей. Поскольку в приложениях СРМ важно не только создание темного пятна (пятна с нулевой интенсивностью) минимального размера, меньшего дифракционного предела, но и обеспечение, по возможности, резкой границы, ограничивающей это пятно, применение  $\pi$ РР с ее относительной простотой изготовления с практической точки зрения делает ее идеальным инструментом для применения в СВМ.

В настоящей работе для изготовления фазовых пластин (ФП) будет предложено использование двулучепреломляющего одноосного кристалла, кристаллическая ось которого ориентирована параллельно поверхности пластины (Y-срез). Выбор материала и условий его обработки, лазерно-индукционной микроплазмой (ЛИМП) позволили создавать разность фаз в  $\pi$ , основанную на эффектах поляризации и возникающую между отдельными частями пучка при прохождении его через изготовленную ФП. Будет выполнено тестирование ФП по трансформации линейно-поляризованного Гауссова пучка в кольцевой в двух схемах, первая из которых является изображающей схемой, а вторая – фокусирующей схемой.

Принцип работы ФП, выполненной на пластине из одноосного двулучепреломляющего кристалла, будет основан на том, что центральная область пластины в форме круга, размер которой, как и размер внешнего кольца, ограничивающего ФП, может изменяться в широких пределах, будет вытравлена на глубину  $h$ , создающую сдвиг фазы в  $\pi$ . На такую же глубину будет вытравлено внешнее кольцо, ограничивающее ФП, соосное с центральным кругом (рис. 1).

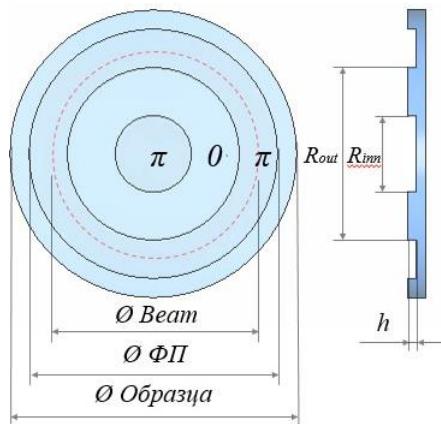


Рис. 1. Схематическое изображение ФП

Ориентация главных осей кристаллической пластиинки под углом 45° по отношению к направлению вектора линейной поляризации в падающей на пластиинку волне обеспечит в каждой из вытравленных областей – и в центральном круге, и во внешнем кольце – поворот вектора поляризации на 90°. Это произойдет при разности хода между обычновенными и необыкновенными волнами в вытравленных на глубину  $h$  областях [16]:

$$n = \Delta = (n_0 - n_e)h, \quad (2)$$

где  $n_0$  – показатель преломления обычновенной волны;  $n_e$  – показатель преломления необыкновенной волны, и, соответственно, разность фаз:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} = (n_0 - n_e)h = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta, \quad (3)$$

значение которой становится равным  $\pi$  при условии [16]:

$$\Delta = \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

Из (1) и (3) следует, что минимальная глубина травления, реализуемая при  $m=0$ , будет иметь вид:

$$h = \frac{\lambda}{2(n_0 - n_e)}. \quad (5)$$

Сдвиг фазы в  $\pi$ , обеспечивающий поворот вектора поляризации на 90°, позволит при установке за фазовой пластииной анализатора (A), с осью пропускания параллельной ориентации вектора линейной поляризации в падающей волне, получить кольцевое распределение интенсивности с резко очерченными границами, в котором интенсивность центральной области в форме круга и во внешнем кольце, ограничивающим ФП, будет равна 0.

Перед изготовлением ФП, по выражению (5) была рассчитана глубина, обеспечивающая преобразование линейно-поляризованного Гауссова пучка в кольцевой, а также рассчитан диапазон глубин травления ФП, делающий их выгодными для применения на длинах волн 0,4–2,0 мкм. Травление поверхности ФП осуществлялось технологией ЛИМП. Эта технология, ранее применялась лишь для обработки прозрачных аморфных материалов, стекол различного состава, в частности ВК7 и плавленого кварца. Физический принцип, положенный в основу данной технологии, и экспериментальная установка для ее реализации подробно изложены в работе [17]. Выполненные эксперименты по формированию ФП позволили определить необходимые режимы записи для достижения требуемых глубин травления, которые приведены в таблице. Также на рис приведена микрофотография поверхности ФП в скрещенных поляризаторах. Отсутствие трещин и выколок свидетельствует о том, что режимы изготовления ФП подобраны верно.

Таблица. Режимы изготовления ФП

Количество проходов сканирующей системы	Скорость сканирования $U$ , мм/с	Средняя мощность $P$ , Вт	Длительность импульсов $\tau$ , нс	Частота следования импульсов $v$ , кГц	Диапазон полученных глубин травления $h$ , мкм
1–5	5–200	2–10	100–200	20–50	1,18–5,9

Для подтверждения способности ФП преобразовывать линейно-поляризованный Гауссов пучок в кольцевой было выполнено тестирование на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. а) тестирование в схеме изображения, а – рис. б) – в схеме фокусировки. Экспериментальная установка включала в себя: Не-Не лазер ( $\lambda=632,8$  нм,  $M^2=1$ ) с линейной поляризацией, (1) с диаметром пучка по уровню энергии  $1/e^2$  1,5 мм, телескопическую систему с увеличением  $3^*$  (2), содержащую пространственный фильтр (3) – непрозрачную пластину с отверстием 50,0 мкм – поляризатор (4), анализатор А (6) с осью пропускания, параллельной ориентации вектора поляризации в падающей на ФП (5) волне, объективная линза (7) с  $f \sim 60,0$  мм, установленный на координатном столе (8), выполненным с возможностью перемещения вдоль оптической оси с точностью  $\pm 0,5$  мкм и ПЗС-камеру (Gentec beamage 3) (9), также установленную на координатном столе (10), выполненной с возможностью перемещения вдоль оптической оси с точностью  $\pm 0,5$  мкм.

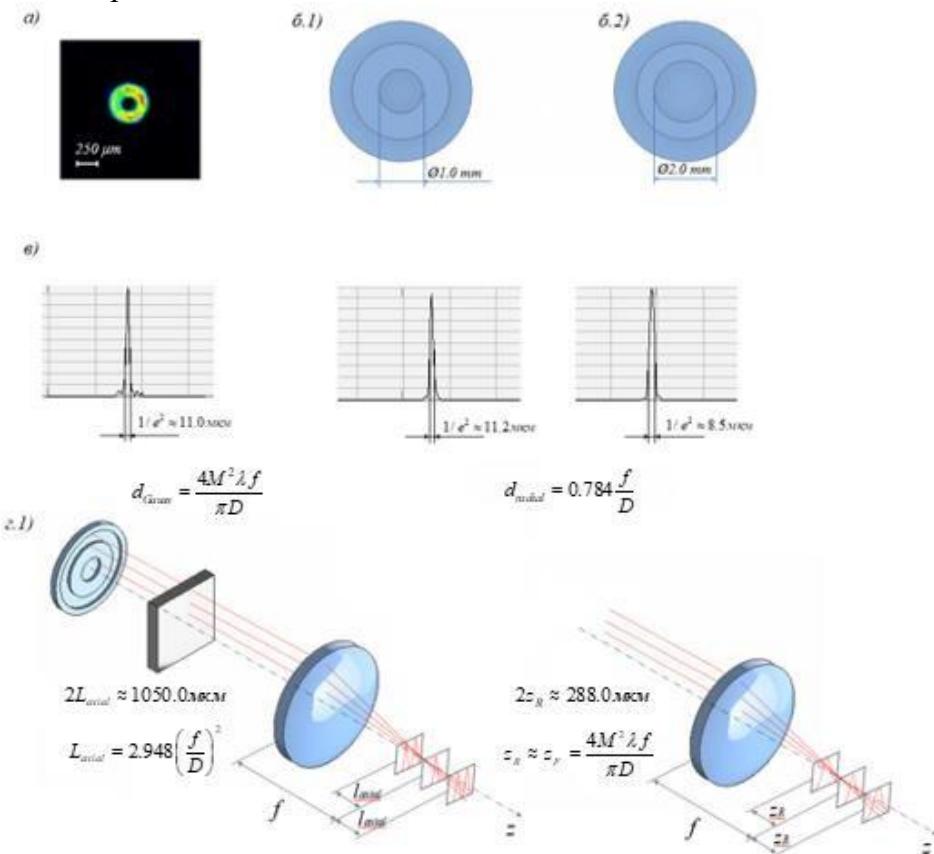


Рис. 2. Изображение кольцевого распределения интенсивности в схеме построения изображения (а); 1, 2 – нормированные графики распределения интенсивности и диаметры пятен остросфокусированных кольцевых пучков при различном диаметре центральной области ФП (б); нормированный график распределения интенсивности и диаметр пятна сфокусированного Гауссова пучка (в); 1, 2 – схематическое изображение для определения глубины фокусировки кольцевого и Гауссова распределений интенсивности (г)

Экспериментальные результаты тестирования ФП иллюстрируются рис. 2, а–г. На рис. 2, а представлено кольцевое распределение интенсивности в схеме построения изображения. На рис. 2, б.1) и б.2) приведены распределения интенсивности в фокальном пятне по уровню интенсивности  $1/e^2$ , в которых на рис. 2, б.1) распределение создается при диаметре  $d_1$  центральной выгравленной области в форме круга, равной 1,0 мм, а на рис. 2, б.2) при  $d_2=2,0$  мм. Из сравнения рис. 2, б.1) и б.2) видно, что, при увеличении диаметра центральной области в форме круга и, соответственно, при уменьшении ширины кольца, имеет место тенденция уменьшения диаметра пятна фокусировки в фокальной плоскости объектива, предсказанная теорией. Рис. 2, в иллюстрирует изменение интенсивности при фокусировке кольцевого пучка МО в окрестностях плоскости фокусировки вдоль оси  $z$ . На рис. 2, г показан диаметр сфокусированного пятна в отсутствие фазовой пластины и анализатора.

Из результатов тестирования схемы построения изображения видно, что особенностью изображения является резкий край кольца, построение которого – ключевой параметр для высокоразрешающей микроскопии.

Также из полученных результатов видно, что диаметр пятна фокусировки Гауссова пучка соизмерим с диаметром пятна фокусировки первой тестируемой ФП и превосходит диаметр второй тестируемой ФП, по крайней мере, в  $\sim 2,0$  раза. Глубина фокусировки Гауссова пучка, определяемая по критерию Рэлея, примерно в 3,5 раза меньше по сравнению с глубиной фокусировки для первой тестируемой ФП и в  $\sim 5,2$  раза меньше для второй тестируемой ФП.

### Заключение

- Представлена простая надежная высокопроизводительная технология изготовления ФП на пластине из одноосного кристаллического материала (исландском шпате), кристаллическая ось которого ориентирована параллельно поверхности пластины. Длительность изготовления ФП по данной технологии не превышает пяти минут.
- Экспериментально был определен диапазон режимов лазерного излучения, обеспечивающего приемлемое качество поверхности в области обработки микроплазменным факелом и заданные глубины травления, необходимые для функционирования ФП в диапазоне длин волн 0,4–2,0 мкм.
- Тестирование ФП было выполнено в двух схемах: в схеме построения изображения уменьшенного кольца в плоскости обработки и в схеме фокусировки излучения.
- Результаты тестирования ФП позволяют надеяться на ее широкое применение в схеме создания кольцевого распределения интенсивности в плоскости изображения с резко-очертанными границами кольца заданным уменьшением, в плоскости, совмещенной с плоскостью лазерной микрообработки.
- Результаты тестирования ФП, полученные в схеме фокусировки кольцевого распределения в дальнем поле с резкой границей фокального пятна также позволяют надеяться на широкое применение ФП не только в области лазерной микрообработки, но и в такой высокотехнологичной области, как микроскопия высокого разрешения и других научных приложениях.

### Литература

- Kim M.S. et al. Engineering photonic nanojets // Optics Express. – 2011. – V. 19. – № 11. – P. 10206–10220.
- Iketaki Y. et al. Creation of a three-dimensional spherical fluorescence spot for super-resolution microscopy using a two-color annular hybrid wave plate // Optics letters. – 2015. – V. 40. – № 6. – P. 1057–1060.
- Wang B. et al. Improved lateral resolution with an annular vortex depletion beam in STED microscopy // Optics letters. – 2017. – V. 42. – № 23. – P. 4885–4888.

4. Niziev V.G., Nesterov A.V. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1999. – V. 32. – № 13. – P. 1455.
5. Makki S., Leger J. Mode shaping of a graded-reflectivity-mirror unstable resonator with an intra-cavity phase element // *IEEE journal of quantum electronics*. – 2001. – V. 37. – № 1. – P. 80–86.
6. Hell S. W. Toward fluorescence nanoscopy // *Nature biotechnology*. – 2003. – V. 21. – № 11. – P. 1347.
7. Davidson N., Ozeri R., Baron R. Fabrication of binary phase surface relief optical elements by selective deposition of dielectric layers // *Review of scientific instruments*. – 1999. – V. 70. – № 2. – P. 1264–1267.
8. Bokor N., Davidson N. Tight parabolic dark spot with high numerical aperture focusing with a circular  $\pi$  phase plate // *Optics communications*. – 2007. – V. 270. – № 2. – P. 145–150.
9. Quabis S. et al. Focusing light to a tighter spot // *Optics Communications*. – 2000. – V. 179. – № 1-6. – P. 1–7.
10. Chen Z., Hua L., Pu J. Tight focusing of light beams: effect of polarization, phase, and coherence // *Progress in Optics*. – Elsevier, 2012. – V. 57. – P. 219–260.
11. Phua P.B. et al. Mimicking optical activity for generating radially polarized light // *Optics letters*. – 2007. – V. 32. – № 4. – P. 376–378.
12. Fadeyeva T.A. et al. Spatially engineered polarization states and optical vortices in uniaxial crystals // *Optics Express*. – 2010. – V. 18. – № 10. – P. 10848–10863.
13. Zhao C.L., Wang L.G., Lu X.H. Radiation forces on a dielectric sphere produced by highly focused hollow Gaussian beams // *Physics Letters A*. – 2007. – V. 363. – № 5-6. – P. 502–506.
14. Peng F. et al. Trapping of low-refractive-index particles with azimuthally polarized beam // *JOSA B*. – 2009. – V. 26. – № 12. – P. 2242–2247.
15. Iketaki Y. et al. Creation of a three-dimensional spherical fluorescence spot for super-resolution microscopy using a two-color annular hybrid wave plate // *Optics letters*. – 2015. – V. 40. – № 6. – P. 1057–1060.
16. Born M., Wolf E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. – 6th Edition. – Elsevier, 2013. – 836 p.
17. Kostyuk G.K. et al. Laser-induced glass surface structuring by LIBBH technology // *Optical and Quantum Electronics*. – 2016. – V. 48. – № 4. – P. 249.

УДК 004.352.2

**ОБРАБОТКА ДАННЫХ В СИСТЕМАХ 3D-СКАНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ  
ПОЛУТОНОВОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОДСВЕТКИ**

Голубев С.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.т.н., профессор Гуров И.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

Исследованы возможности созданной сканирующей системы с эмуляцией когерентной подсветки и с расшифровкой данных с помощью алгоритмов, разработанных для интерференционных измерительных систем на основе методов фазового сдвига. Отличие предложенного подхода от классических сканеров на основе цифрового кодирования заключается в более высокой помехоустойчивости обработки данных, а также в том, что ошибка восстановления фазы и рельефа объекта является гауссовой. Таким образом, при повторном измерении объекта с теми же исходными данными результаты можно усреднить и получить несмещенные оценки параметров поверхности объекта сканирования.

**Ключевые слова:** 3D-сканирование, метод фазового сдвига, высокая точность сканирования, гауссовская ошибка восстановления формы объекта.

**Введение.** Технологии бесконтактного сканирования широко применяются в различных областях деятельности: при производстве и контроле качества промышленных изделий, в научных исследованиях, при исследованиях произведений искусства, в информационной сфере и индустрии развлечений.

Одними из первых появились системы 3D-сканирования с когерентной подсветкой. В таких системах объект освещался картиной интерференционных полос, сформированных в интерферометре. Подобные системы позволяли обеспечить эффективное управление параметрами интерференционных полос за счет изменения параметров интерферометра. Преимуществом таких систем является высокая точность восстановления формы объекта. К их недостаткам можно отнести: сложность юстировки, наличие спекл-шума, проблемы с яркостью подсветки, неравномерным распределением подсветки по полю, низкую помехозащищенность, значительные размеры, вес и высокую стоимость оборудования [1]. Перечисленные недостатки привели к тому, что такие системы были вытеснены системами с цифровыми проекторами в качестве источника структурированной подсветки и генерированием бинарных паттернов. Недостаток использования бинарных паттернов состоит в меньшей помехозащищенности и разрешающей способности по сравнению с полуточковыми паттернами, используемыми в предлагаемом варианте 3D-сканера.

**Метод восстановления формы объекта при сканировании в режиме эмуляции когерентной структурированной подсветки.** Разработанная система 3D-сканирования и метод расчета фазы позволяют восстановить значение фазы объекта в каждой точке кадра. При этом смещение фазы на  $2\pi$  эквивалентно смещению на величину  $d$  (шаг полос) в плоскости кадра.

Схема сканера представлена на рис. 1. Методика измерения формы объектов заключается в следующем. Объект устанавливается на поворотный столик, за объектом устанавливается плоский белый экран, для которого производится регистрация картин полос и восстановление «опорной» фазы. Затем экран заменяется черной матовой тканью с получением области объекта на темном фоне. Перед экраном устанавливается поворотный столик с объектом. Для каждого угла поворота столика обеспечивается подсветка объекта с заранее рассчитанными картинами полос.

Дополнительно объект подсвечивается белым фоном для выделения границ. Полученные данные обрабатываются после регистрации, при этом для каждого угла поворота столика восстанавливается граница объекта и в пределах границ восстанавливаются зарегистрированные значения фазы.

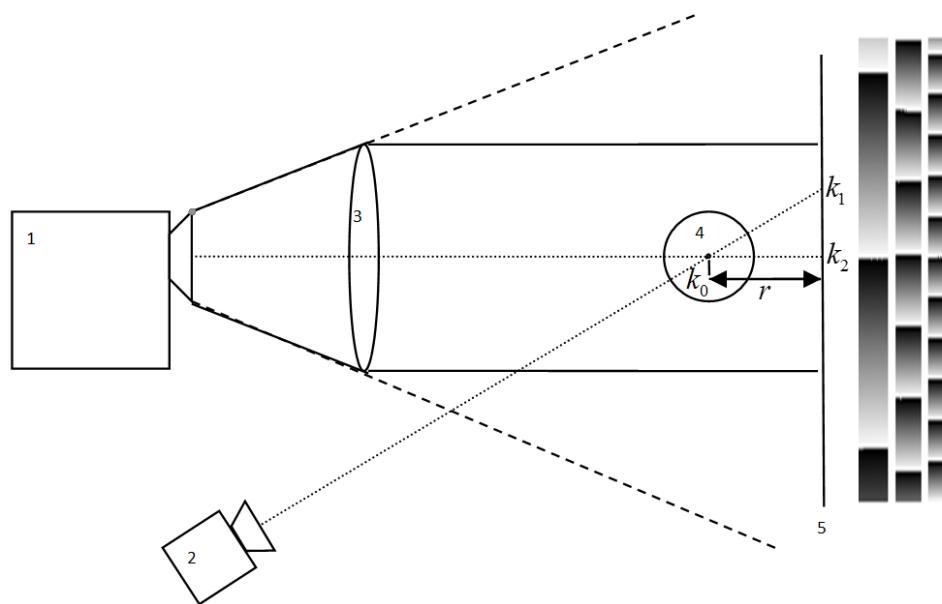


Рис. 1. Схема 3D-сканера с полутононными паттернами: 1 – проектор; 2 – камера; 3 – линза; 4 – поворотный столик; 5 – экран и примеры паттернов с различным шагом

При восстановлении фазы в плоскости экрана объект убирается из сканера и в точке  $k_0$  наблюдается фаза  $\phi$ , соответствующая точке  $k_1$  экрана. При размещении в точке  $k_0$  объекта восстановленная фаза соответствует фазе в точке экрана  $k_2$ . Форма объекта может быть восстановлена из наблюдаемых смещений фазы.

**Экспериментальные результаты.** В ходе работы использованы два макета сканера. В первом варианте использована линза, собирающая лучи подсветки проектора в параллельный пучок, что позволяло не производить перерасчет координат точек объекта. Использование такой схемы снизило зависимость от разрешения камеры, но ограничивало максимальный размер объекта диаметром линзы. Во втором варианте сканера линза была изъята из установки и производился перерасчет координат точек объекта в привязке к системе координат, связанной с центром экрана. Это позволило сканировать более крупные объекты. Для экспериментов были использованы объекты из различных материалов (рис. 2).



Рис. 2. Примеры объектов из гипса (а) и фарфора (б)

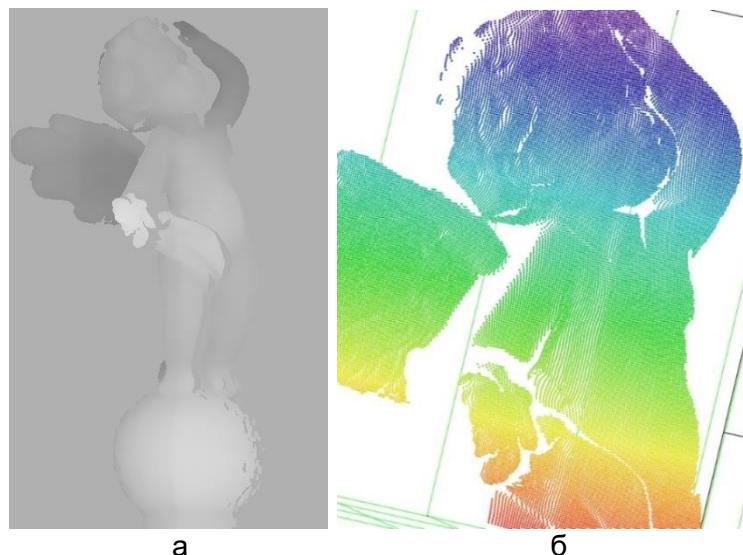


Рис. 3. Карта глубины (а) и пример облака точек (б), составляющих поверхность

Как показано на рис. 3 отсканированная поверхность не имеет «ступенчатой» структуры и является гладкой. Метод восстановления фазы позволяет снизить погрешность до  $2\pi/100$ , что в данном случае при минимальном шаге полутоновых полос в 0,5 см обеспечивает точность порядка 0,05 мм.

Далее представлены результаты восстановления формы объекта, полученные при сканировании вторым вариантом сканера. В работе показано, что такой метод сканирования позволяет получить модель с гладкой поверхностью, без «ступенек». Кроме того, предложенный метод восстановления фазы позволил сканировать объект и в тех местах, где наблюдался блик.

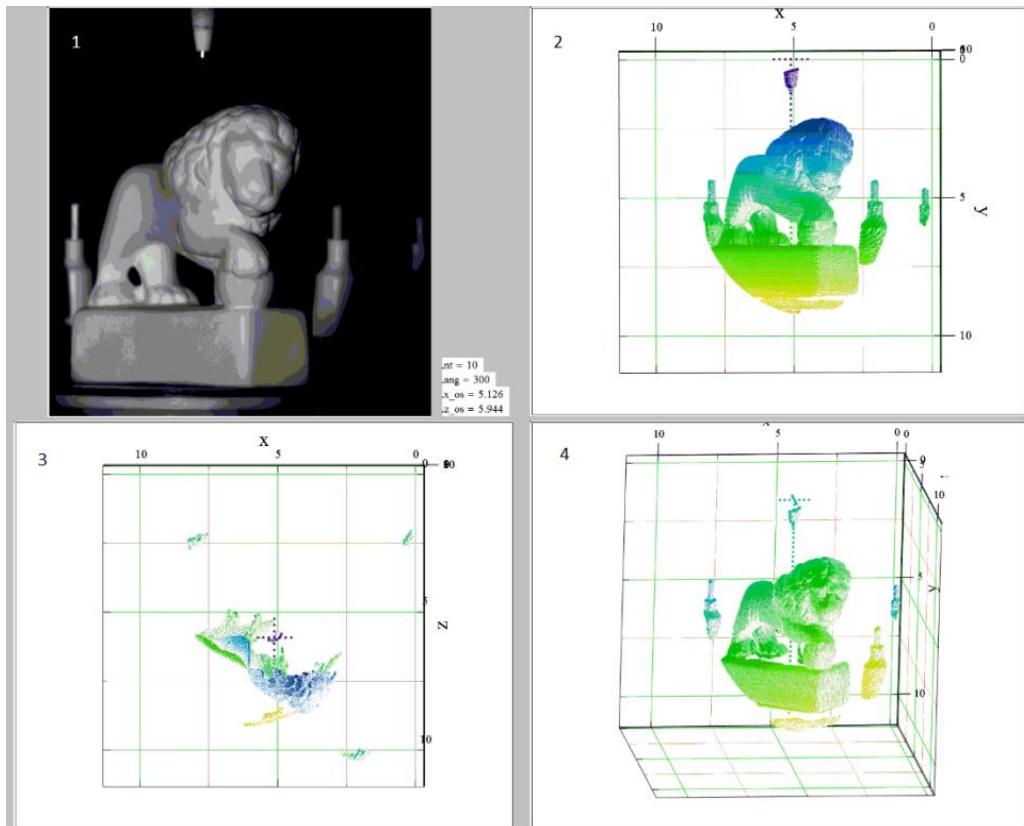


Рис. 4. Результат восстановления формы объекта: 1 – объект, восстановленное облако точек; 2 – вид спереди; 3 – вид сверху; 4 – изометрический вид

Рис. 4 демонстрирует высокую точность восстановления формы объекта, а также преимущества такого подхода, состоящие в помехоустойчивости, вариативности размеров измеряемого объекта и возможности определить физические координаты и размеры объекта.

**Заключение.** В работе исследованы методы восстановления формы объектов с использованием макета 3D-сканера в режиме эмуляции когерентной структурированной подсветки. Разработан макет 3D-сканера, собранный из широко доступных и относительно дешевых компонентов. В процессе работы решались задачи коррекции искажений в оптической системе. Разработана методика регистрации и программное обеспечение, позволяющие провести восстановление формы объектов с различных ракурсов. Проведено измерение формы объектов с различными размерами, из различных материалов и для различных углов сканирования.

### **Литература**

1. Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial // Advances in Optics and Photonics. – 2011. – V. 3. – № 2. – P. 128–160.

УДК 544.537

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ РЕШЕТОК НА КРЕМНИИ МЕТОДОМ  
ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМЫГресько В.Р.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н., н.с. Сергеев М.М.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В данной работе, методом лазерно-индуцированной микроплазмы, на поверхности кристаллического кремния была изготовленная дифракционная фазовая решетка. В качестве источника лазерного излучения был выбран квазинепрерывный CO<sub>2</sub> лазер, а в качестве материала мишени – плавленый кварц. Полученная решетка была протестирована для целей расщепления лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм. В результате удалось получить расщепление лазерного пучка на 0 и ±1 порядки дифракции.

**Ключевые слова:** микроплазма, кремний, дифракционная фазовая решетка, лазерная микрообработка, расщепление лазерного пучка.

**Введение.** В последнее время наряду с прямой лазерной обработкой, все большую популярность приобретают лазерно-индуцированные методы. Используя преимущества прямой обработки, такие как бесконтактное воздействие, высокая скорость обработки и низкая трудоемкость, эти методы позволяют обрабатывать материалы прозрачные для излучения используемого лазера. Одним из них является метод лазерно-индуцированной микроплазмы (ЛИМП) [1, 2]. Обработка прозрачного образца происходит под действием плазменного факела, который образуется при абляции материала мишени, сильно поглощающей лазерное излучение и расположенной вблизи обрабатываемой поверхности. Чаще всего, при помощи ЛИМП обрабатываются стекла и стеклообразные материалы, которые являются прозрачными для излучения большинства технологических лазеров.

Методом ЛИМП на стеклах изготавливаются дифракционные оптические элементы (ДОЭ), например, дифракционные фазовые решетки (ДФР) [3], работающие с излучением в широком диапазоне длин волн. Тем не менее, ДОЭ на основе стекол не могут работать с излучением одного из самых широко используемых технологических лазеров – CO<sub>2</sub> лазера, ввиду большого поглощения в этом спектральном диапазоне. Для него применяются другие материалы, например, ZnSe [4] или Si [5]. Не смотря на то, что подобные материалы могут подвергаться прямой лазерной обработке, возникает интерес в распространении на них метода ЛИМП, с целью оценки его эффективности. Для этого был выбран кремний, на котором методом ЛИМП требуется записать ДФР. Мишенью выступала пластина плавленого кварца (SiO<sub>2</sub>). В отличие от других материалов, используемых в качестве мишеней, вроде графита [6], SiO<sub>2</sub> не загрязняет поверхность образца при обработке, что уменьшает трудоемкость процесса. В качестве источника излучения был выбран CO<sub>2</sub> лазер, излучение которого пропускается кремнием и хорошо поглощается плавленым кварцем.

**Эксперимент.** Параметры CO<sub>2</sub> лазера, излучающего на основной моде, были следующими: длина волны  $\lambda = 10,6$  мкм, длительность импульса  $\tau = 200$  мкс, частота следования импульсов  $v = 5$  кГц. Обработка производилась при помощи установки, схема которой представлена на рис. 1. CO<sub>2</sub> лазер 1, и подвижный двухкоординатный стол 5 управлялись с помощью компьютера 8. Лазерное излучение, пройдя систему зеркал 2 и 3, попадало в германиевый объектив 4 с фокусным расстоянием  $f_o = 25$  мм, который формировал пучок диаметром  $d_o = 25$  мм. В фокусе располагалась плоскость обработки и граница раздела между пластиной кремния 6 и плавленым кварцем 7. В качестве оптимальных параметров обработки были выбраны: плотность мощности в

центре пятна  $q = 1,4 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ , скорость сканирования  $V_{\text{ск}} = 0,5 \text{ мм/с}$ , расстояние между линиями ДФР  $l = 70 \text{ мкм}$ .

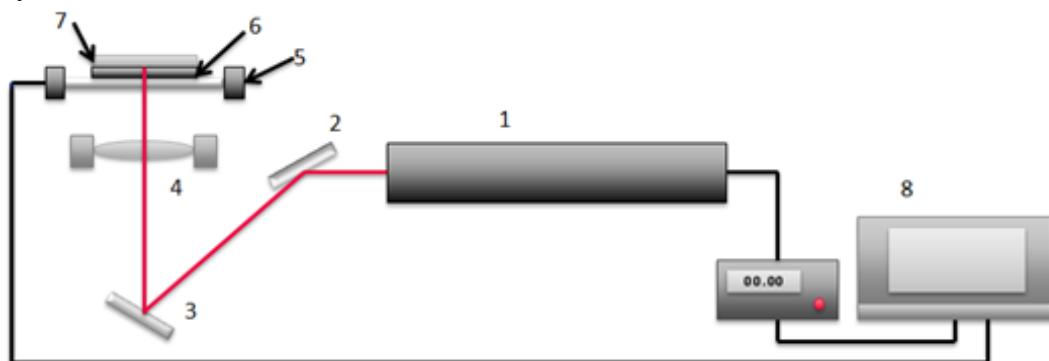


Рис. 1. Схема установки

Обрабатываемая сторона кремния, была прижата к поверхности плавленого кварца. Излучение лазера фокусировалось в плоскости их контакта. В этом месте происходило резкое увеличение температуры. Кварц быстро нагревался до температуры испарения, а пластина кремния – до температуры размягчения. Происходило образование плазменного факела, который формировал на поверхности кремния рельеф ДФР.

**Результаты.** Изготовление ДФР размером  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  заняло около 15 мин. Поверхность сформированной решетки была исследована с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Imager A1 в отраженном свете (рис. 2, а). Размеры рельефа более детально были исследованы на профилометре Hommel Tester T8000 (рис. 2, б). Изготовленная фазовая решетка обладала периодом  $p=70 \text{ мкм}$ . Высота рельефа  $h$  в разных участках решетки составляла в среднем около  $0,8 \text{ мкм}$ .

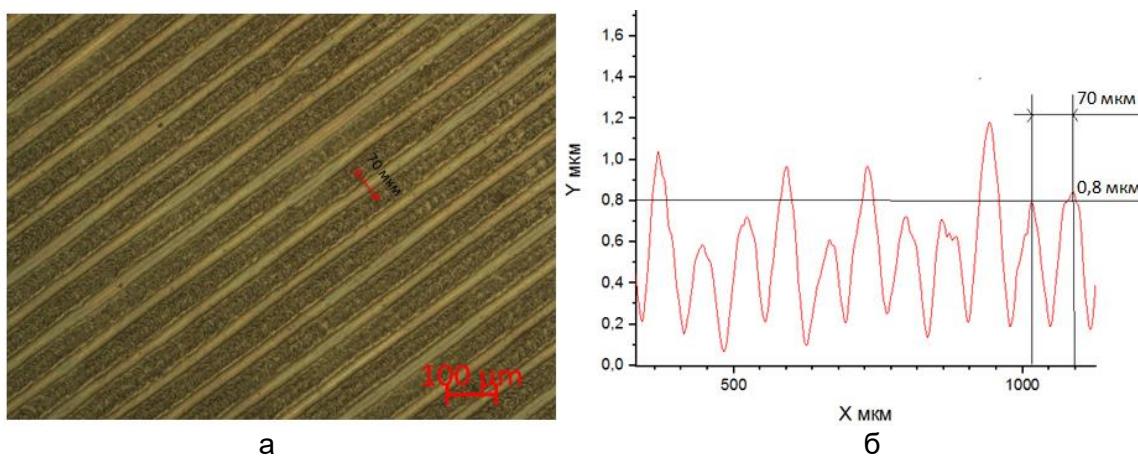


Рис. 2. Фазовая решетка с периодом  $70 \text{ мкм}$  (а); профиль поверхности фазовой решетки с глубиной рельефа  $0,8 \text{ мкм}$  (б)

Перед тестированием ДФР были рассчитаны некоторые ее характеристики. Расстояние между 0 и  $\pm 1$  порядками дифракции и дифракционная эффективность этих порядков рассчитывались с помощью (1) и (2) соответственно:

$$L(q) = \frac{q\lambda f_n}{p}, \quad (1)$$

$$\eta(q) = J_q^2 \left( \frac{\pi h(n-1)}{\lambda} \right), \quad (2)$$

где  $q$  – порядок дифракции;  $f_{\text{л}} = 80 \text{ мм}$  – фокусное расстояние ZnSe линзы;  $p = 70 \text{ мкм}$  – период ДФР;  $J_q$  – функция Бесселя 1-го рода  $q$  порядка;  $h=0,8 \text{ мкм}$  – глубина рельефа ДФР;  $n$  – показатель преломления кремния для излучения с длиной волны  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ . Рассчитанные значения составили  $L(\pm) = \pm 12 \text{ мм}$ ,  $\eta(0) = 0,845$ ,  $\eta(\pm) = 0,076$ .

**Тестирование решетки.** ДФР была протестирована для целей расщепления лазерного пучка на несколько порядков дифракции (рис. 3). В качестве источника лазерного излучения использовался тот же CO<sub>2</sub> лазер 1 с длиной волны  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ , длительностью импульса  $\tau = 200 \text{ мкс}$  и частотой следования импульсов  $v = 5 \text{ кГц}$ . Перед лазером располагалась кремневая ДФР 2. За решеткой располагалась собирающая ZnSe линза 3 с фокусным расстоянием  $f_{\text{л}} = 80 \text{ мм}$ . В фокусе линзы располагался обрабатываемый образец 4. В этой роли выступала термобумага. Дифракционная решетка последовательно устанавливалась под углами 0, 10° и 20°. Плотность мощности излучения в центре лазерного пятна составила  $q = 5,7 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ .

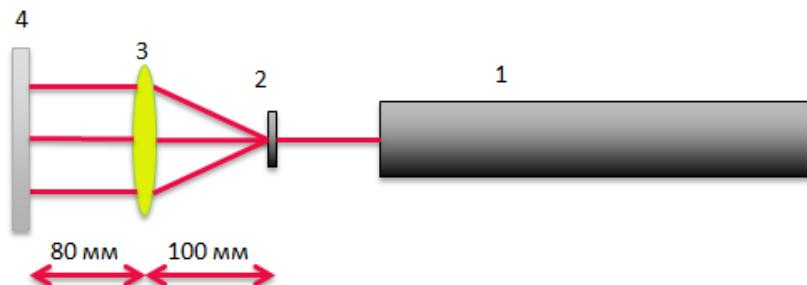


Рис. 3. Схема тестирования ДФР (вид сверху)

Результаты тестирования представлены на рис. 4. Лазерный пучок CO<sub>2</sub> лазера был расщеплен на 0 и  $\pm 1$  порядки дифракции. В нулевом порядке было сосредоточено больше энергии, чем в  $\pm 1$  порядках. Расстояние между порядками составило около 14 мм. Диаметр центрального пятна составил  $d_{\text{ц}}=2,5 \text{ мм}$ , а диаметр пятен по краям составил около  $d_{\text{к}}=0,7 \text{ мм}$ .

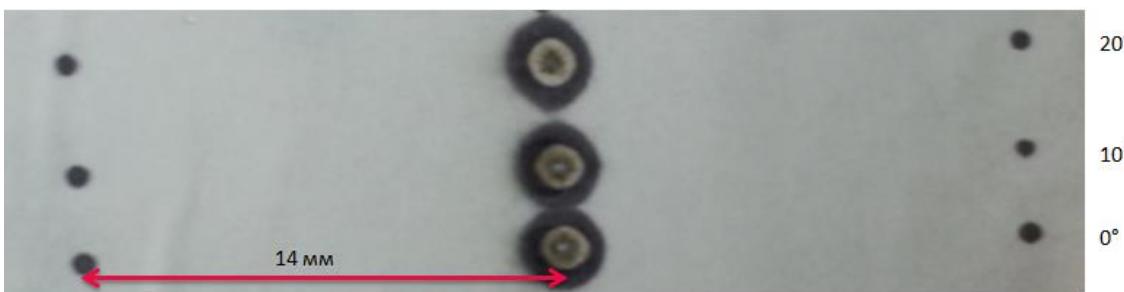


Рис. 4. Пятна, полученные при помощи ДФР

**Заключение.** В работе была изготовлена ДФР на поверхности кристаллического кремния при помощи лазерно-индуцированной микроплазмы. Для обработки использовались CO<sub>2</sub> лазер и мишень из плавленого кварца. С помощью решетки удалось получить расщепление 10 мкм лазерного пучка на 0 и  $\pm 1$  порядки дифракции. При помощи ЛИМП возможно изготовление кремниевых ДФР с другими параметрами рельефа, что может привести к изменению расстояний между порядками, и к другому распределению энергии между порядками. Кроме того, используя полученную ДФР, можно реализовать двухлучевую интерференцию для целей обработки материалов.

Наконец, возможно провести сравнение решеток, записанных методом ЛИМП и решеток, изготовленных при помощи прямой лазерной записи.

### **Литература**

1. Zhang J., Sugioka K., Midorikawa K. Micromachining of glass materials by laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) using a conventional nanosecond laser // Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing IV. – 1999. – V. 3618. – P. 363–370.
2. Xu S. et al. Ultrafast fabrication of micro-channels and graphite patterns on glass by nanosecond laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) for electrofluidic devices // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – V. 247. – P. 204–213.
3. Kostyuk G.K. et al. Laser microplasma as a tool to fabricate phase grating applied for laser beam splitting // Optics and Lasers in Engineering. – 2017. – V. 92. – P. 63–69.
4. Ebata K. et al. Optical properties of ZnSe diffractive optical elements for spot array generation // Wave-Optical Systems Engineering. – 2001. – V. 4436. – P. 140–151.
5. Smolik G.M., Herzig H.P. Binary zero-order diffractive and anti-reflective optical elements in silicon for the mid-infrared // Optics letters. – 2017. – V. 42. – № 16. – P. 3233–3235.
6. Zakoldaev R. et al. Laser-induced Black-body Heating (LIBBH) as a Method for Glass Surface Modification // Journal of Laser Micro/Nanoengineering. – 2015. – V. 10. – № 1. – P. 15–19.

UDK 535.317.2

## OPTICAL SYSTEM OF AGRICULTURE OBSERVATION

Gong Z.<sup>1</sup>, Tsyganok E.A.<sup>1</sup>Supervisor – Associate Professor, PhD, Tsyganok E.A.<sup>1</sup><sup>1</sup>ITMO University

A multispectral optical system is used to solve problems in agriculture, such as detection of damage to crops by adverse meteorological phenomena, detection of damage to crops by pests and diseases, monitoring of germination of grain, detection of the situation to which weeds are distributed, etc. These devices are installed on unmanned aerial vehicles. A feature of such system is that the camera can take photographs of one area in different spectral ranges, which recognizes spectral signatures from objects and allows more detailed information in a shorter time.

**Keywords:** multispectral imaging, agriculture observation, spectral range (VIS, NIR).

**Introduction.** Recently, remote sensing has been actively using to solve practical problems in agriculture, which need to be indirect, non-destructive measured and update data to ground station automatically. In general, unmanned aerial vehicles (UAV) is used for load and mount devices of photography and scientific Instruments, such as camera and spectrometer. UAV flies to agriculture land at low speed, the camera could recognize spectral signatures from objects and allows more detailed information in a shorter time [1–4].

This article is devoted to design and analysis some parts (fore telescope system, light splitting system and detector) of multispectral optical system for agriculture observation, which has shared aperture and multiple-bands (VIS and NIR). Compared to simple telescope system, this system has advantages that the shared aperture part is applied to reduce the space and weight of system as much as possible, the spectrum range of VIS and NIR could widely use for data analysis and condition judgement of agriculture land.

**Process of design.** From above characteristics, the flowchart of multispectral optical system design is shown as fig. 1, and original structure of this type of system is shown as fig. 2.

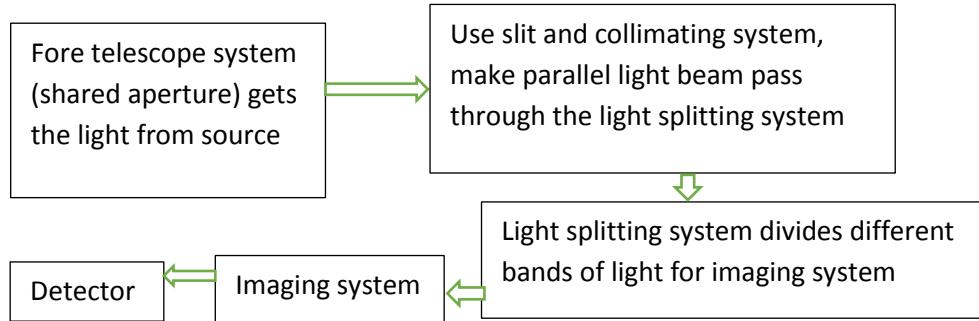


Fig. 1. Flowchart of multispectral optical system design

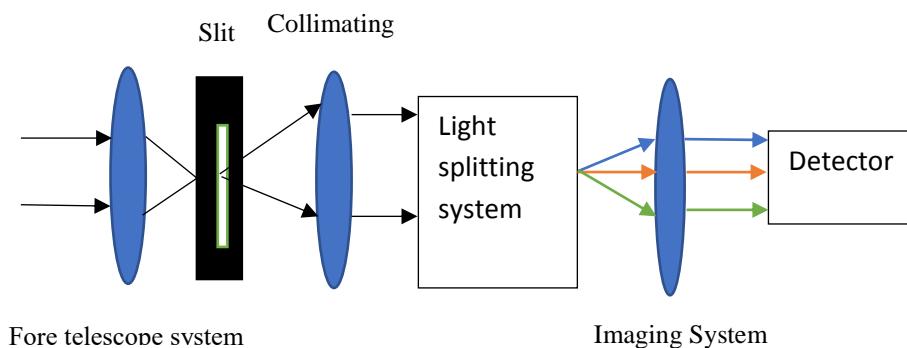


Fig. 2. Original structure of this type of system

For Fore telescope system, we can use the combination of simple reflection system which is based on Cassegrain system and refraction lenses. From the requirement of agriculture observation, the telescope system should have features that short focal length to get more field of view for observation, wide spectrum, medium F-number, good image quality. For aberration optimization, it's better to make reflection-refraction structure of Fore telescope system. Fig. 3 shows characteristics of Fore telescope system. Although the focal length of this system has little larger focal length and little field of view, but we can make the UAV which installed with camera fly with low speed, and the flying height of UAV is more, in order to non-destructive non-interfering measurement. This system has good image quality from fig. 4.

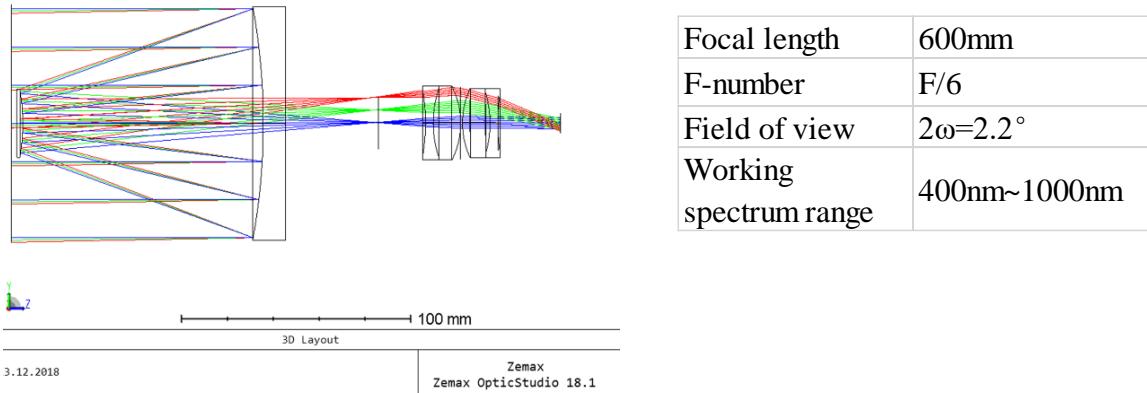


Fig. 3. Layout and parameters of refraction-reflection telescope system

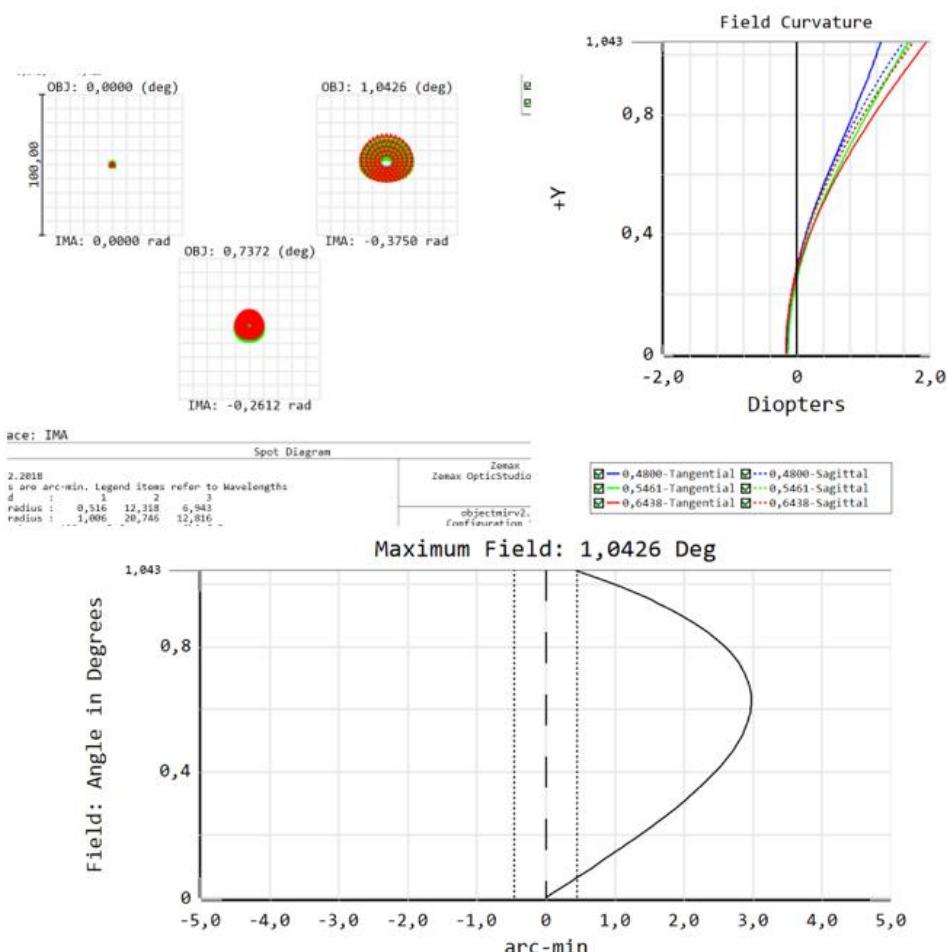


Fig. 4. Image quality of refraction-reflection telescope system

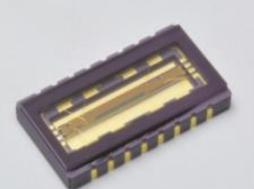
For light splitting system, multispectral optical system has three common types of splitting elements: prism, filter, grating. In general, we can directly get spectrum which we need by using filter, but the range of filter doesn't large, so we need many filters to light splitting. So, the cost of filter way is expensive and filters will cover bands each other in wide spectrum range (VIS, NIR). To compare grating and prism(single), fig. 5 shows the ability comparison between them.

Ability	grating	prism
Splitting linearity	+	-
Efficiency	=	+
Resolution	++	=
Interference in working spectrum bands	exist	no
Temperature sensibility	normal	larger than grating

Fig. 5. Splitting ability comparison between grating and prism (For ability ++ is high, + is good, = is normal and – is poor)

After comparison, grating has obviously disadvantages: interference in wider working spectrum bands, good splitting linearity cause the linearity chromatic dispersion, lower splitting efficiency will influence imaging effect. But single prism also has many disadvantages, such as large spectral line bending and nonlinear chromatic dispersion, worse thermostability, etc. We can use the composing prisms, such as double Amici prisms, can reduce the disadvantages of single prism, correct the aberration, and make the structure of light splitting system more clearly.

For detector part, we choose one detector to receive light after imaging system. This detector should have suitable spectrum range, good resolution, smaller detector size. We choose CMOS s14739-20 as detector, which made from Hamamatsu company and has wide spectral response range for three different bands (Including UV, VIS, NIR) (fig. 6).



Parameters	Value
Pixel size	0.3μm *0.6μm
Detector size	12.5*7*1.1(LWH/mm)
Photosensitivity	1300V / lx·s
Spectral	200~1000nm

Fig. 6. CMOS s14739-20 and its parameters

**Conclusion.** In this article, we design and analysis three parts of multispectral optical system for agriculture observation. In fore telescope system, use reflection-refraction telescope with shared aperture, has good image quality. For light splitting system, compare advantages and disadvantages of three types of splitting elements, combined with requirements of system, finally choose double Amici prism. For detector part, we choose a CMOS as detector of system, which has wide spectrum range and high resolution. In later work, we can do the structure design (glasses combination types) of Amici prism by calculation and relation of deviation angle and system spectrum resolution; We can use refraction telescope by shorter focal length, widely field of view and make the flight height suitable for agriculture land; We also need to design rest parts of system and optimize them for better effect, and consider about hyperspectral imaging for further use in agriculture observation.

**References**

1. Gao M., Liu B., Liu J. Design of visible light, medium/long-infrared tri-band share-aperture and con-focal optical system // *Laser & Infrared.* – 2015. – V. 45. – № 3. – P. 301–306.
2. Shan Q., Liu K., Yan P. Design of wide-spectrum directed multispectral imaging system with visible light // *Proceedings of SPIE.* – 2018. – V. 10840. – № 8. – 9 p.
3. Park B., Lawrence K.C., Windham W.R. Hyperspectral imaging for food processing automation // *Proceedings of SPIE.* – 2002. – V. 4816. – P. 308–316.
4. Xing T. The design of miniature multispectral camera system // *Changchun university of science and technology.* – 2016. – 55 p.

УДК 535.37/535.343

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ГЕНЕРАЦИИ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА ХЛОРИНОМ Е6****ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН****Дададжанова А.И.<sup>1</sup>, Колесова Е.П.<sup>1</sup>, Златов А.С.<sup>1</sup>****Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Орлова А.О.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе исследованы фотофизические свойства хлорина Е6 в состоянии мономеров, димеров и агрегатов более высоких состояний. Создан макет ультразвуковой установки, который позволяет исследовать влияние ультразвука частотой 1–1,7 МГц и мощностью 1–5 Вт на фотохимические свойства молекул и наноструктурированных материалов. Проведено исследование влияния ультразвука на люминесцентные свойства хлорина Е6 и его агрегатов. Показано, что при воздействии ультразвука частотой 1,7 МГц и мощностью 1 Вт на раствор хлорина Е6 при pH=4 наблюдается тушение люминесценции димеров и разгорание люминесценции агрегата хлорина Е6, люминесцирующего в области 680 нм.

**Ключевые слова:** хлорин Е6, синглетный кислород, квантовый выход люминесценции, агрегация, тетрапиррольные молекулы, ультразвуковая кавитация, ультразвук, соносенсибилизатор.

**Введение.** Распространение онкологических заболеваний в настоящее время достигло угрожающих масштабов, и поиск новых методов эффективной терапии онкологических заболеваний является социально значимой задачей. Существует несколько традиционных способов лечения рака: химиотерапия, хирургическое удаление, гормональная терапия, лучевая терапия, каждый из которых имеет побочные эффекты. Метод фотодинамической терапии (ФДТ) является одним из самых щадящих эффективных методов терапии онкологических заболеваний [1]. ФДТ основывается на способности светочувствительных сенсибилизаторов избирательно накапливаться в тканях опухоли, и под действием излучения видимого диапазона переходить в возбужденное состояние, в котором они способны генерировать активные формы кислорода (АФК). Увеличение концентрации АФК в клетках запускает процессы, которые приводят к некрозу или апоптозу раковых клеток [2].

Использование наноструктурированных материалов в качестве сенсибилизаторов позволит увеличить эффективность терапии за счет возможности сочетания физических и химических методов воздействия на опухоль [3, 4], что позволит реализовать комплексный мультимодальный подход в терапии [5]. Тетрапиррольные соединения, в частности хлорин Е6 и структуры на его основе, широко используются в качестве сенсибилизаторов в ФДТ [6]. Несмотря на преимущества ФДТ перед традиционными методами терапии, она имеет один существенный недостаток, ограничивающий применение данного метода в клинической практике. Биологические ткани сильно поглощают излучение видимого диапазона, необходимое для перевода сенсибилизатора в возбужденное состояние. Этот факт ограничивает применение данного метода исключительно в терапии эпителиальных форм рака и некрупных опухолей. Альтернативой ФДТ может стать сонодинамическая терапия (СДТ) [7], в которой в качестве внешнего воздействия используется ультразвук. Поскольку глубина проникновения ультразвука в ткани существенно больше, чем у света, использование метода СДТ позволяет снять основное ограничение ФДТ в терапии глубоко расположенных и обширных опухолей.

Исследование сонодинамического эффекта, который производит сочетание УЗ и соносенсибилизатора на биологические ткани, свидетельствует об его комплексной природе, которая сочетает в себе сразу несколько механизмов, приводящих к гибели клеток [8]. Наиболее вероятными механизмами принято считать кавитацию и

генерацию активных форм кислорода сенсибилизаторами под действием УЗ. Некоторые научные группы рассматривают соносенсибилизаторы как усилители терапевтического действия УЗ. При этом отмечается, что использование агрегатов, которые выступают как центры усиления кавитации, позволяет значительно увеличить эффективность СДТ [9]. При этом существует ряд работ, доказывающих, что возможен и второй механизм сонодинамического эффекта-генерация АФК традиционными сенсибилизаторами, используемыми в ФДТ [10]. Очевидно, что максимальный эффект может быть достигнут при сочетании этих двух механизмов. Для реализации этого необходимо, чтобы соносенсибилизатор одновременно выступал как центр кавитации и был способен генерировать АФК. Для достижения синергетического эффекта необходимо использование модельного объекта, физические свойства которого позволяют исследовать генерацию АФК под действием излучения и ультразвука в условиях контролируемой агрегации, т.е. в состоянии мономеров, димеров и более крупных агрегатов. В качестве такого объекта может выступить хлорин еб, который, как хорошо известно, способен генерировать АФК под действием излучения видимого диапазона [11] и под действием УЗ [12]. Кроме того, агрегацию молекул хлорина еб можно контролировать уровнем pH раствора [13]. Существуют работы, в которых продемонстрировано, что воздействие УЗ может приводить к дезагрегации агрегатов наночастиц, что может затруднить создание мультиомодального соносенсибилизатора. Поэтому особый интерес представляет исследование влияния УЗ на степень агрегации молекул хлорина еб, их оптические свойства и способность генерировать АФК.

**Цель работы.** Выявление зависимости степени агрегации и люминесцентных свойств молекул хлорина еб от времени воздействия ультразвука частотой 1,7 МГц.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

1. создание коллоидного раствора молекул хлорина еб с принципиально разной степенью его агрегации;
2. исследование зависимости оптических свойств хлорина еб от степени его агрегации;
3. исследование эффективности генерации синглетного кислорода молекулами хлорина еб с разной степенью агрегации под действием видимого излучения;
4. создание макета установки для воздействия на образцы ультразвуковой волной;
5. исследование влияния УЗ на степень агрегации хлорина еб.

**Материалы и методы.** В данной работе в качестве сенсибилизатора использовалась люминесцирующая тетрапириольная молекула (рис. 1, а) хлорин еб (FrontierScientific, США). Для определения генерации синглетного кислорода молекулами хлорина еб использовался химический сенсор SOSG [14] (Lifetechnologies, США).

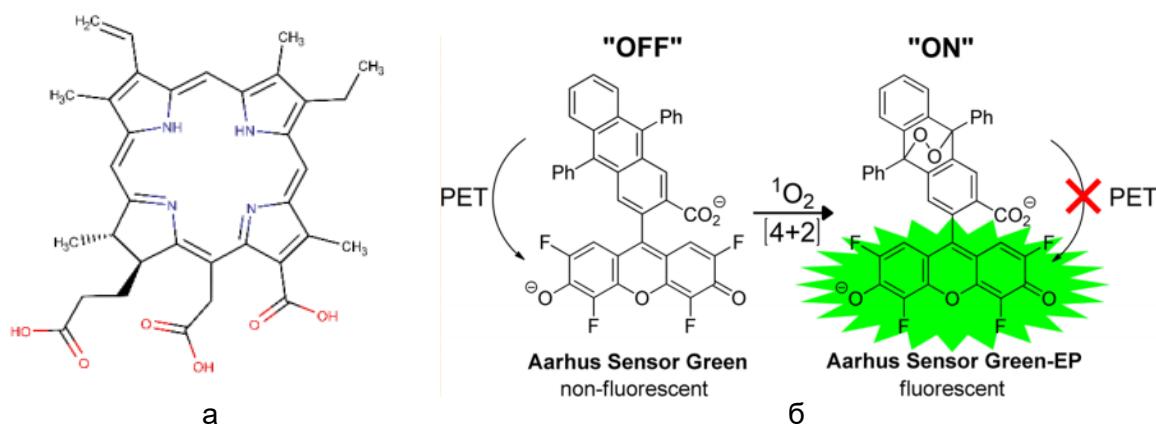


Рис. 1. Структурная формула молекулы хлорина еб (а); принцип работы химического сенсора SOSG (б)

Для исследования эффективности генерации синглетного кислорода молекулами хлорина был использован химический сенсор SOSG. Принцип работы данного сенсора заключается в следующем: до реакции с синглетным кислородом, внутримолекулярный перенос электрона гасит люминесценцию сенсора (рис. 1, б). Однако в присутствии синглетного кислорода перенос электрона прекращается, что приводит к появлению люминесценции на длине волны 525 нм.

Для исследования генерации синглетного кислорода был создан раствор молекул хлорина eб и сенсора SOSG в тяжелой воде ( $D_2O$ ). Полученный образец подвергался воздействию внешнего излучения с максимумом излучения 630 нм (мощность  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Вт), лежащего в области поглощения хлорина eб. Во время облучения периодически регистрировались спектры люминесценции и поглощения образца.

Для регистрации спектров поглощения использовался спектрофотометр UV Probe 3600 (Shimadzu, Japan), для регистрации спектров люминесценции использовался спектрофлуориметр CaryEclipse (Varian, Australia). Для исследования воздействия ультразвука на степень агрегации хлорина eб, был использован макет ультразвуковой установки с резонансной частотой 1,7 МГц и интенсивностью  $\leq 1$  Вт/см<sup>2</sup>.

Степень агрегации молекул хлорина eб контролировалась изменением pH воды путем добавления HCl. Было сформировано три образца с pH 8, 6 и 4, которые соответствуют мономерам и различным агрегатам хлорина eб.

**Результаты и обсуждение.** На рис. 2 приведены спектры поглощения и люминесценции хлорина eб при разном уровне pH.

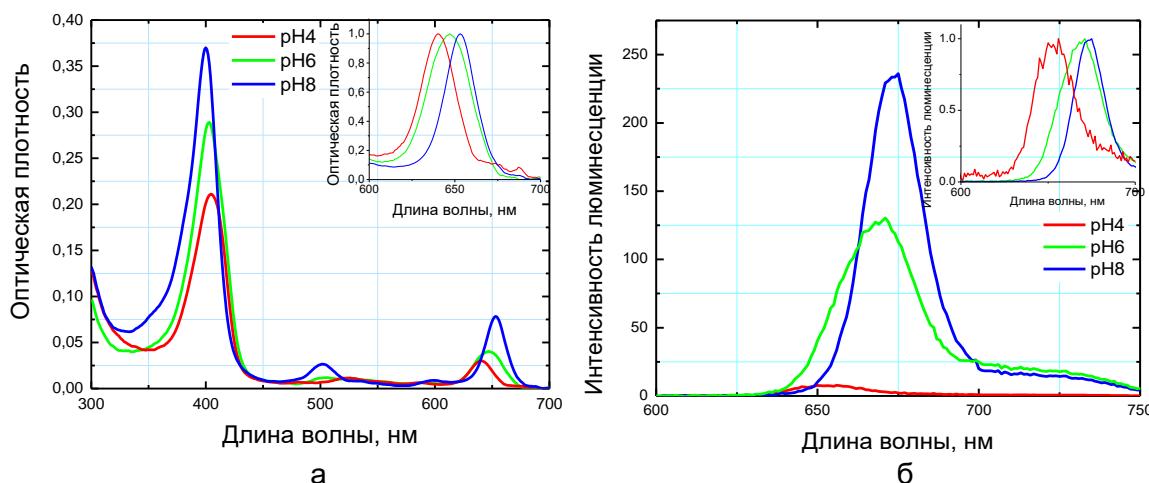


Рис. 2. Спектры поглощения и люминесценции Себ в водном растворе с разным уровнем кислотности

Как видно из рис. 2 при уменьшении pH происходит уменьшение оптической плотности (рис. 2, а) и интенсивности люминесценции (рис. 2, б) хлорина eб, что сопровождается их гипсохромным сдвигом. Наблюдаемые изменения в спектрах люминесценции и поглощения свидетельствуют об агрегации хлорина eб: мономер при щелочном pH=8, смесь мономера и димера при нейтральном pH=6 и смесь димера с агрегатами более высокого порядка при кислом pH=4. Наблюдаемые эффекты хорошо согласуются с литературными данными [15] и должны сопровождаться уменьшением эффективности генерации синглетного кислорода хлорином eб.

На рис. 3 приведена зависимость интенсивности люминесценции сенсора SOSG на длине волны 525 нм от дозы поглощенного излучения молекулами хлорина eб с разной степенью агрегации.

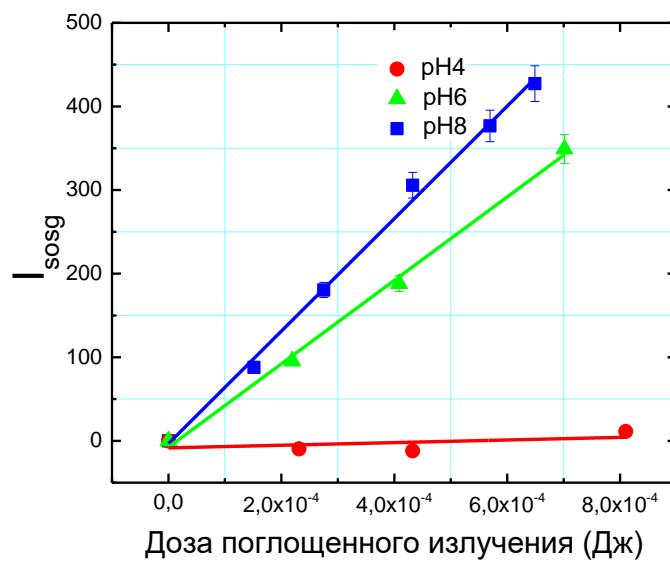


Рис. 3. Зависимость интенсивности люминесценции сенсора от дозы поглощенного излучения

Как видно из рис. 3 эффективность генерации синглетного кислорода зависит от степени агрегации молекул хлорина еб. Так для мономеров хлорина еб (pH 8) наблюдается наибольшее увеличение люминесценции сенсора, что свидетельствует об эффективной генерации синглетного кислорода. В то время как облучение агрегатов хлорина еб (pH 4) не приводит к существенным изменениям в люминесценции сенсора. Согласно зарегистрированным спектрам люминесценции, при кислом pH исследуемый образец представляет собой смесь димеров и более высоких агрегатов хлорина еб. Наличие сигнала люминесценции димеров хлорина еб с максимумом люминесценции на длине волны 650 нм (рис. 2, б) должно сопровождаться генерацией синглетного кислорода с низкой эффективностью. Поэтому тот факт, что люминесценции сенсора в этом случае не наблюдается, скорее всего, свидетельствует о невозможности его применения в таких условиях для корректной оценки эффективности генерации синглетного кислорода и необходимости использования другого метода исследования эффективности этого процесса.

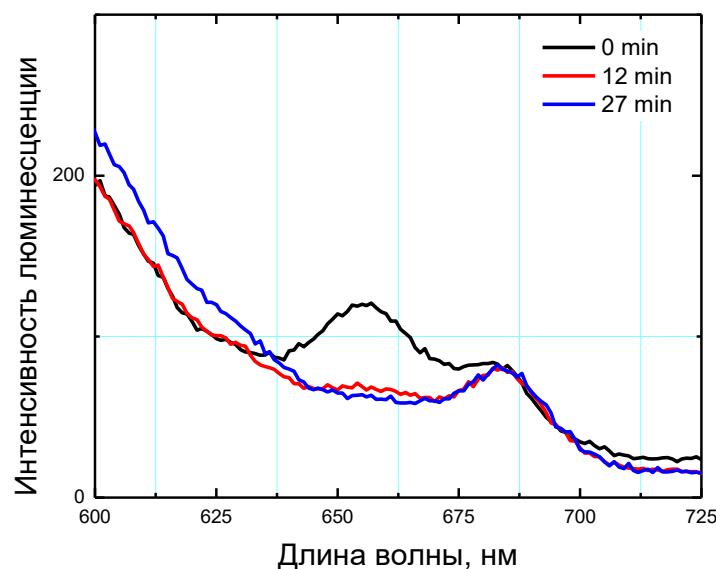


Рис. 4. Спектры люминесценции хлорина еб при воздействии ультразвука с частотой 1,7 МГц (pH=4)

В данной работе исследовалось влияние ультразвука, параметры которого соответствуют УЗ применяемому в СДТ, на степень агрегации Себ. Для этого был собран макет ультразвуковой установки с резонансной частотой 1,7 МГц и интенсивностью  $\leq 1$  Вт/см<sup>2</sup>. Водный раствор (рН4) хлорина еб, представляющий собой смесь димеров хлорина еб и его агрегатов более высоких состояний подвергался воздействию УЗ в течение 30 мин, степень агрегации хлорина еб контролировалась по спектру люминесценции. Такой способ контроля состояния хлорина еб является корректным, поскольку в случае дезагрегации хлорина еб до мономерного состояния следует ожидать появления полосы люминесценции хлорина еб с максимумом на длине волны 660 нм.

На рис. 4 приведены спектры интенсивности люминесценции хлорина еб (рН 4) при внешнем воздействии УЗ.

Как видно из рис. 4, воздействие на агрегаты хлорина еб УЗ приводит к изменениям его люминесцентных свойств. В исходном спектре различимы две полосы люминесценции хлорина еб на 655 и 685 нм, соответствующие димерам и агрегатам хлорина еб более высокого порядка. В результате воздействия УЗ люминесценция димеров в спектрах люминесценции больше не наблюдается, при этом люминесценция второго типа агрегатов становится более ярко выраженной. Следует отметить, что в водных растворах люминесцирующие агрегаты высоких порядков ранее нами не наблюдались. Поэтому стехиометрия данных агрегатов хлорина еб на данный момент неизвестна. В дальнейшем планируется исследование эффективности генерации синглетного кислорода длинноволновыми агрегатами хлорина еб, что поможет установить их природу и оценить их перспективность использования в качестве соносенсибилизаторов.

**Заключение.** В работе был собран макет ультразвуковой установки, которая позволяет исследовать влияние ультразвука на оптические свойства и способность генерации активных форм кислорода, включая синглетный кислород, органических соединений и наноструктурированных материалов, которые могут являться потенциальными соносенсибилизаторами. Показано, что в кислой среде раствор хлорина еб представляет собой смесь димеров и агрегатов более высоких порядков. Обнаружен агрегат хлорина еб, полоса люминесценции которого находится в области меньших энергий, чем у мономерной формы хлорина еб. Показано, что 30-ти минутное воздействие УЗ на водный раствор хлорина еб при рН=4 приводит к исчезновению люминесценции димеров хлорина еб и увеличению интенсивности люминесценции в области нового типа агрегата хлорина еб, характеризующегося люминесценцией в области 680 нм. Природу данного агрегата хлорина еб и его способность генерировать синглетный кислород планируется установить в продолжении работы.

## Литература

1. Li B., Lin L., Lin H. and Wilson B.C. Photosensitized singlet oxygen generation and detection: Recent advances and future perspectives in cancer photodynamic therapy // *J. Biophotonics*. – 2016. – V. 9. – № 11-12. – P. 1314–1325.
2. Simon H.-U., Haj-Yehia A. and Levi-Schaffer F. Role of reactive oxygen species (ROS) in apoptosis induction // *Apoptosis*. – 2000. – V. 5. – № 5. – P. 415–418.
3. Botella P., Ortega Í., Quesada M., Madrigal R.F., Muniesa C., Fimia A., Fernández E. and Corma A. Multifunctional hybrid materials for combined photo and chemotherapy of cancer // *Dalt. Trans.* – 2012. – V. 41. – № 31. – P. 9286–9296.
4. Liu J., Yang Y., Zhu W., Yi X., Dong Z., Xu X., Chen M., Yang K., Lu G. and Jiang L. Nanoscale metal– organic frameworks for combined photodynamic & radiation therapy in cancer treatment // *Biomaterials*. – 2016. – V. 97. – P. 1–9.

5. Tempany C.M.C., Jayender J., Kapur T., Bueno R., Golby A., Agar N. and Jolesz F.A. Multimodal imaging for improved diagnosis and treatment of cancers // *Cancer*. – 2015. – V. 121. – № 6. – P. 817–827.
6. Martinez De Pinillos Bayona A., Mroz P., Thunshelle C. and Hamblin M.R. Design features for optimization of tetrapyrrole macrocycles as antimicrobial and anticancer photosensitizers // *Chem. Biol. Drug Des.* – 2017. – V. 89. – № 2. – P. 192–206.
7. Wan G.-Y., Liu Y., Chen B.-W., Liu Y.-Y., Wang Y.-S. and Zhang N. Recent advances of sonodynamic therapy in cancer treatment // *Cancer Biol. Med.* – 2016. – V. 13. – № 3. – P. 325.
8. Van den Bijgaart R.J.E., Eikelenboom D.C., Hoogenboom M., Fütterer J.J., den Brok M.H. and Adema G.J. Thermal and mechanical high-intensity focused ultrasound: perspectives on tumor ablation, immune effects and combination strategies // *Cancer Immunol. Immunother.* – 2017. – V. 66. – № 2. – P. 247–258.
9. Tuziuti T., Yasui K., Sivakumar M., Iida Y. and Miyoshi N. Correlation between acoustic cavitation noise and yield enhancement of sonochemical reaction by particle addition // *J. Phys. Chem. A*. – 2005. – V. 109. – № 21. – P. 4869–4872.
10. Xu C., Dong J., Ip M., Wang X. and Leung A.W. Sonodynamic action of chlorin e6 on *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* // *Ultrasonics*. – 2016. – V. 64. – P. 54–57.
11. Song X., Feng L., Liang C., Gao M., Song G. and Liu Z. Liposomes co-loaded with metformin and chlorin e6 modulate tumor hypoxia during enhanced photodynamic therapy // *Nano Res.* – 2017. – V. 10. – № 4. – P. 1200–1212.
12. Rosenthal I., Sostaric J.Z. and Riesz P. Sonodynamic therapy-a review of the synergistic effects of drugs and ultrasound // *Ultrason. Sonochem.* – 2004. – V. 11. – № 6. – P. 349–363.
13. Mocanu M.N. and Yan F. Ultrasound-assisted interaction between chlorin-e6 and human serum albumin: pH dependence, singlet oxygen production, and formulation effect // *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* – 2018. – V. 190. – P. 208–214.
14. Pedersen S.K., Holmehave J., Blaikie F.H., Gollmer A., Breitenbach T., Jensen H.H. and Ogilby P.R. Aarhus sensor green: a fluorescent probe for singlet oxygen // *J. Org. Chem.* – 2014. – V. 79. – № 7. – P. 3079–3087.
15. Isakau H.A., Parkhats M.V., Knyuksho V.N., Dzhagarov B.M., Petrov E.P. and Petrov P.T. Toward understanding the high PDT efficacy of chlorin e6-polyvinylpyrrolidone formulations: Photophysical and molecular aspects of photosensitizer-polymer interaction in vitro // *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* – 2008. – V. 92. – № 3. – P. 165–174.

УДК 621.391.63

**СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ЧЕЛОВЕКА ПО ТЕХНОЛОГИИ LI-FI В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ  
ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ**

Дегтярева С.А.<sup>1</sup>, Полухин И.С.<sup>1</sup>, Шарипо К.Д.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.т.н., доцент Смирнова И.Г.<sup>1</sup>

Научный консультант – д.ф.-м.н., профессор Бугров В.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

Системы медицинской диагностики в реабилитационный период представляют главную траекторию развития медицинской практики в силу роста рецидивов. В этом случае прибегают к дистанционному домашнему наблюдению и регулярному отображению физиологических данных. Основная проблема в том, что дистанционное наблюдение в таких условиях может затянуться на долгое время, поэтому для комфорта все чаще обращаются к мониторингу состояния благодаря носимым объектам. Объектом исследования является сенсорная куртка, считающая в условиях общественного пространства физиологическое состояние пациента, и обеспечивающая систему отслеживания по технологии Li-Fi в случае их отклонения от нормы.

**Ключевые слова:** Light fidelity (Li-Fi), беспроводная передача данных, связь по видимому свету медицинская диагностика, смарт-одежда.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», шифр 2017-14-582-0001-084, соглашение № 14.581.21.0029 от 23.10.2017, уникальный идентификатор RFMEFI58117X0029.

**Введение.** Большая перспектива применения беспроводной передачи данных находится во многих направлениях, одно из которых – открытые общественные пространства с низким уровнем посещаемости в вечернее время. Актуальность системы беспроводной передачи данных в городской среде представлена сразу несколькими научно-исследовательскими областями. Прежде всего, диапазоны частот от единиц МГц до десятков ГГц являются очень загруженными, в связи с чем требуется альтернативный способ передачи, разгружающий данный диапазон. Преимуществом такой связи является высокая помехозащищенность, безопасность на физическом уровне, а также возможность работы в местах, где радиочастотный спектр ограничен или недоступен. Более того, внедрение системы беспроводной оптической связи в открытых пространствах представляет собой не только проблемно-ориентированный, но и человеко-ориентированный подход, повышающий информационное качество городской среды. Таким образом, данная тема перспективна для создания «сенсорной ткани» города, учитывающего существующую световую структуру и потребности пользователей данной среды [1–4].

Изменения образа жизни и ритма социальной активности в мегаполисе существенно повышают необходимость благоустройства общественных пространств в вечернее время. Поэтому одной из приоритетных задач становится создание световой среды, адаптируемой к потребностям горожан и открытой для новых возможностей. В то же время взаимодействие человека с окружающей средой обеспечивает предметно-пространственное окружение, во многом сопровождающееся дневным и вечерним образом мест. Вечерний образ, в отличие от дневного, создает полную инверсию восприятия из-за мало освещенных участков, что делает передвижение потребителя по городскому маршруту крайне небезопасным. В свою очередь следствием этого является низкий уровень проходимости. Поэтому задача организации световой среды должны поддерживать уровень комфорта, безопасности и соответствовать потребностям потребителей. В последнее время общественные пространства становятся не только местом для проведения досуга, но и мультипользовательской

средой. Парки, сады, аллеи ежедневно посещают множество групп пользователей, от родителей с детьми, до пожилых людей, предрасположенных к внезапному ухудшению физиологического состояния. В условиях малой проходимости в вечернее время это может привести к негативным последствиям вследствие неоперативной медицинской помощи. Одно из возможных решений – развитие городской среды на уровне функционального пространства, которое обеспечивало бы контроль состояния на физиологическом уровне. Подобные системы диагностики включают процесс, который рассматривает контроль внутреннего состояния людей, подверженных сердечнососудистым заболеваниям и с ограниченными физическими возможностями. При рассмотрении данного вопроса учитываются параметры, которые необходимо рассматривать в системе контроля и сравнивать их с эталонным диапазоном значения. В психологии, например, используют электрическую активность кожи (ЭАК) с поверхности ладони, по величине которой можно определить уровень эмоционального возбуждения человека. Изменения сердечных сокращений как индикатор состояния служат более объективными показателями степени эмоционального напряжения у человека в отличие от ЭАК, однако зависит во многом от эмоционального напряжения и может быть неустойчивым показателем.

Технология Li-Fi рассматривается и как метод передачи данных при медицинской практике. Внедрение беспроводной передачи данных от датчиков, установленных на теле потенциального пациента, могло бы решить достаточно такую серьезную проблему как экстренная передача данных в тех общественных пространствах, где фиксируется минимальная проходимость в вечернее и ночное время. В этом смысле дистанционное наблюдение в медицинской практике нуждается в разработке системы мониторинга и регулярного отслеживания состояния пациентов благодаря разработке алгоритмов для контроля физиологических сигналов в качестве входных данных.

Особое внимание сегодня обращают на себя проекты умной одежды третьего поколения, которые создают новую форму коммуникации и мониторинга эмоционального состояния. Это объясняется тем, что развиваются новые возможности для самореализации пользователей в пространстве. Реакция может осуществляться с помощью мягких, гибких сенсоров или встроенных в структуру материала датчиков. Подобный подход направлен на две цели: в одном случае для адаптации носимого объекта под состояние человека, а в другом случае – для отображения данных во внешней среде (например, отображение физиологического состояния цветом). Однако если первый подход работает на пользователя и является скрытой формой коммуникации, то второй зависит непосредственным образом от субъективного восприятия и не всегда позволяет адекватно интерпретировать эти данные в условиях городского пространства.

Цель работы – разработка куртки, считывающей физиологическое состояние пациента в условиях общественного пространства и обеспечивающая таким образом систему экстренной передачи данных по технологии Li-Fi в случае их отклонения от нормы.

**Промежуточные результаты.** На первом этапе было проведено два эксперимента, направленных на выявление взаимосвязи между внутренними чувствами и цветового восприятия. Работа проводилась на базе Высшей школы светового дизайна Университета ИТМО в рамках магистерской диссертации «Применение сенсорных технологий для оценки эмоционального состояния человека».

Для первого эксперимента было создано 12 стимулов, основанных на цветовой градации позитивных и негативных эмоций. В эксперименте приняло участие 44 респондента, которым было предложено оценить, насколько данные изображения соответствуют их восприятию. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

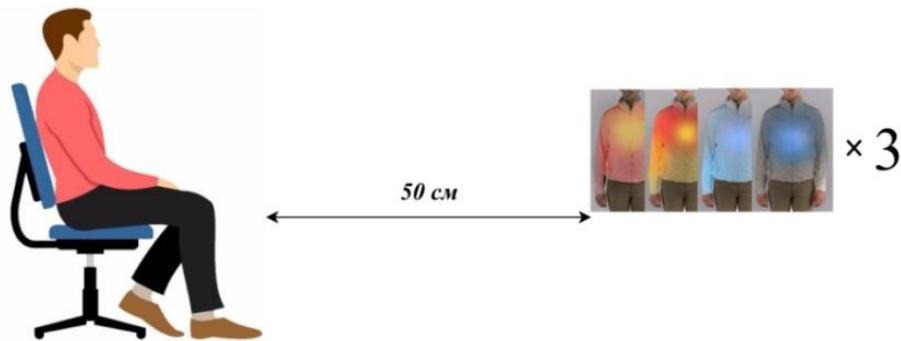


Рис. 1. Схематическое представление экспериментальной части

Эксперимент показал взаимосвязь между холодным цветом и негативными эмоциями (грусть, страх), и между теплым цветом и положительными эмоциями.

Второй эксперимент проводился с целью выявления критерия распознавания эмоциональных стимулов. При рассмотрении цветового стимула в прямом наблюдении респонденты объясняли свои ощущения на основе ранее пережитых событий. Таким образом, в ходе эксперимента были составлены негативные и позитивные отклики с ключевыми фразами.

**Макет.** В данном разделе рассматривается сенсорная куртка с технологией двунаправленной высокоскоростной беспроводной связи для дистанционного информирования о физиологическом состоянии пользователя.

Куртка состоит из трех слоев: тканевого, рассеивающего и основного с встроенными светодиодными лентами. На данный момент объект работает от сети 220 Вт и имеет один режим свечения. Схема куртки представлена на рис. 2.

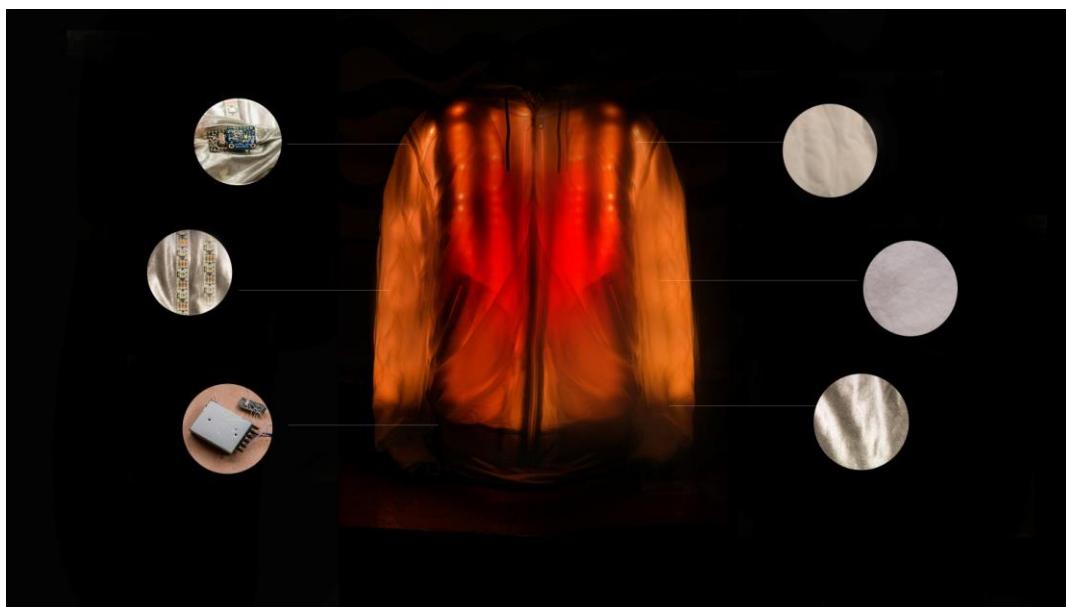


Рис. 2. Устройство сенсорной куртки

Принцип передачи данных предполагается следующим образом: носимый объект считывает в режиме реального времени психофизиологические параметры: пульс, сердцебиение и электрическую активность кожи (кожно-гальваническая реакция). В случае отклонения значения от диапазона нормальных значений сигнал с датчиков передается на контроллер. Контроллер передает данные на приемно-передающий модуль. В свою очередь приемно-передающий модуль по технологии Li-Fi передает данные на ближайший светильник. Светильник подключен в единую глобальную сеть.

**Заключение.** В работе проведено исследование влияния абстрактных изображений на интерпретацию эмоционального состояния. Определен критерий распознавания скрытого эмоционального состояния на примере цветового стимула. Выявлена целевая аудитория и группа потребителей. Проведен процесс прототипирования и разработана концепция для дальнейшей работы, связанная с внедрением сенсорных элементов и компонентов, участвующих в технологии.

Используя данный подход, становится возможным автоматически передавать экстренные сигналы скорой помощи в случае обнаружения отклонения контролируемого параметра от критического, что ускоряет процесс информирования о своевременной медицинской помощи в момент физических осложнений.

### **Литература**

1. Dimitrov S., Haas H. Principles of LED light communications: towards networked Li-Fi. – Cambridge University Press, 2015. – 228 p.
2. Лекус Е.Ю., Быстрянцева Н.В. Световая культура города. Часть I. Проблемный подход. Учебно-методическое пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 123 с.
3. Cannon, Walter B. Bodily Changes in Pain, Hunger, Fear and Rage-An Account of Recent Researches Into the Function of Emotional Excitement (1927). Read Books Ltd, 2013. – 334 p.
4. Вундт В. Основы физиологической психологии. Чувства и аффекты. – СПб., 1880. Вып. 55 (т. 3. Г-Л., XVI). – С. 216.

УДК 681.7.063

**МИНИМИЗАЦИЯ ГИСТЕРЕЗИСА РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО СИГНАЛА  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ТЕНЗОМЕТРА НА ОСНОВЕ РЕШЕТОК  
БРЭГГА**

**Дмитриев А.А.<sup>1</sup>, Варжель А.С.<sup>1</sup>, Грибаев А.И.<sup>1</sup>, Новикова В.А.<sup>1</sup>, Варжель С.В.<sup>1</sup>  
Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Варжель С.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Университет ИТМО

Одной из областей применения волоконных брэгговских решеток является их использование в системах измерения механического напряжения, называемых тензометрическими датчиками. Представленные на данном этапе работы способы улучшения методики крепления чувствительной части датчика в той или иной степени решают проблему возникновения гистерезиса, исключая ошибки в результирующем сигнале. В рамках данной работы произведена модернизация методики точечного крепления волоконно-оптического тензометрического датчика, выполнено испытание макета тензометрического датчика, а также произведен анализ полученных данных и построены основные зависимости сдвига центральной длины волны волоконной решетки Брэгга от величины удлинения.

**Ключевые слова:** волоконная брэгговская решетка, тензометрия, тензометрический датчик, оптическое волокно, балка равного сопротивления изгибу.

**Введение.** Современные тенденции ведут к увеличению интереса к разработке волоконно-оптических датчиков (ВОД), использующих волоконные брэгговские решетки (ВБР) в качестве чувствительного элемента измерения физических величин, таких как давление, температура, деформация и др. [1–3]. Изменение внешних воздействий на материал (температуры, механический напряжений, давления и т.д.) приводит к изменению его геометрических параметров, что справедливо и для оптического волокна (ОВ) [4]. Кроме этого, изменение геометрических характеристик ОВ приводит к изменению его показателя преломления, а также к изменению параметров, записанных в него ВБР, в частности их периода. Анализируя данные изменения можно судить о характере внешних воздействий на ВБР.

**Условия эксперимента.** Для проведения экспериментальных исследований макета тензометрического датчика на основе ВБР был собран лабораторный стенд, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

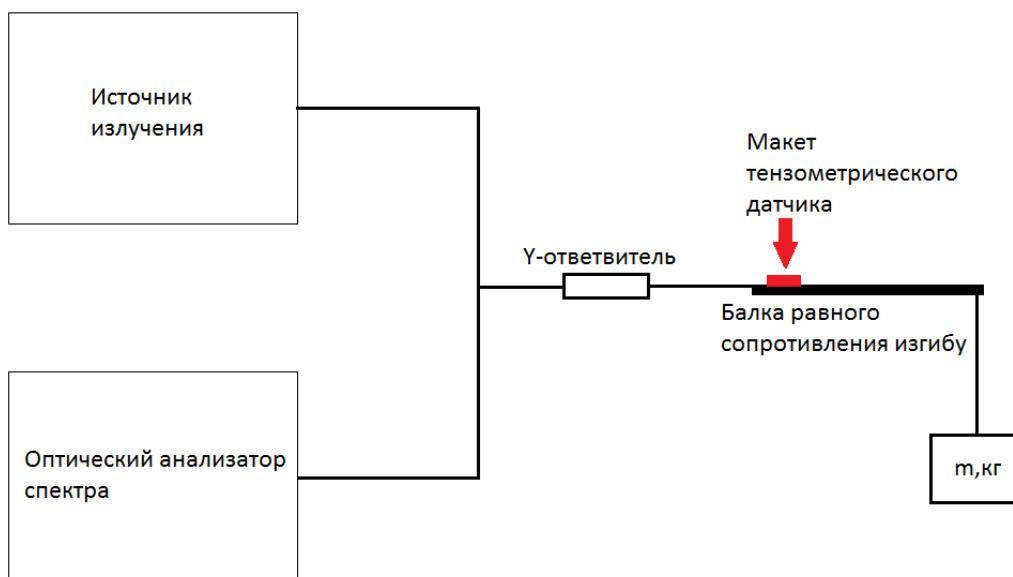


Рис. 1. Схема лабораторного стенда механического воздействия на ВБР и контроля ее спектральных характеристик

При создании прототипа оснастки тензометрического датчика был выполнен чертеж в системе трехмерного моделирования КОМПАС-3D (рис. 2), с заданными пространственными характеристиками: ширина 25,4 мм; длина 132 мм, толщина 1 мм. Стоит отметить, что для изготовления макета оснастки была выбрана коррозионностойкая сталь марки 12Х18Н10.

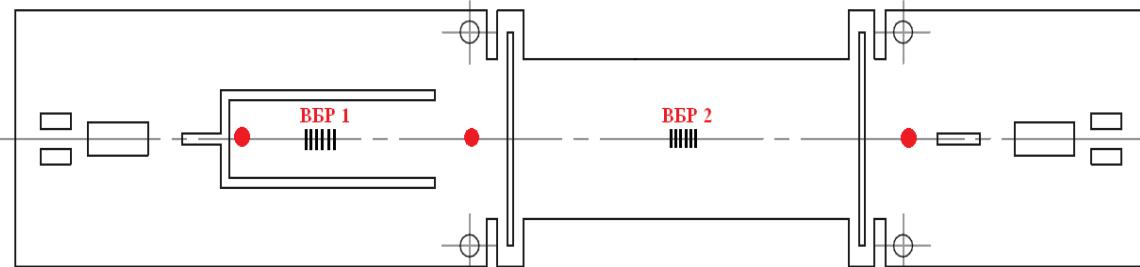


Рис. 2. Чертеж прототипа тензометрического датчика

Конструкция тензометрического датчика позволяет производить измерения деформации с возможностью внедрения дополнительной опорной ВБР (ВБР1 на рис. 2) для компенсации температурного влияния. Красными точками выделены места клеевого соединения ОВ с оснасткой прототипа тензометра. ВБР1 находится в свободном от влияния растяжения положении. ВБР2 закреплена на «базе» тензометрического датчика, где от прикладываемой нагрузки происходит удлинение участка ОВ, приводящее к сдвигу центральной длины волны ВБР2.

ВБР закрепляется на поверхности тензодатчика клеевым соединением за кварцевую оболочку ОВ. Состав клеевой композиции, используемой для всех клеевых соединений в рамках данной работы представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав клеевой композиции

Смола ЭД-20	32,5%
Полиэтиленполиамин	17,5%
Свинцовый сурик	50%

Стоит отметить, что при проведении экспериментов использовались ВБР с идентичными параметрами, представленными в табл. 2.

Таблица 2. Параметры используемых ВБР

Тип волокна	SMF-28
Коэффициент отражения	~90%
Длина	10 мм

Посредством обезжикивания ацетоном, промывки спиртом склеиваемых поверхностей, а также хорошей просушки клеевой композиции после соединения обеспечивается крепкое клеевое соединение.

**Подготовка измерительного стенда.** Балка равного сопротивления изгибу, которая является основой лабораторного стенда, испытывает одинаковые наибольшие нормальные напряжения во всех сечениях при заданной нагрузке [5–7].

Исходя из геометрических габаритов прототипа датчика, а также диапазона предполагаемых измерений ( $\varepsilon=2500 \times 10^{-6}$ ), для изготовления балки равного сопротивления изгибу (рис. 3) была выбрана конструкционная рессорно-пружинная сталь марки 60С2А, толщиной 8 мм. Максимальная нагрузка материала, при которой не происходит пластическая деформация составила  $\sigma_T=1375$  МПа, что, теоретически, позволяет достигнуть относительного удлинения до 6400 мкм/м. Модуль Юнга такого материала равен 210 ГПа.

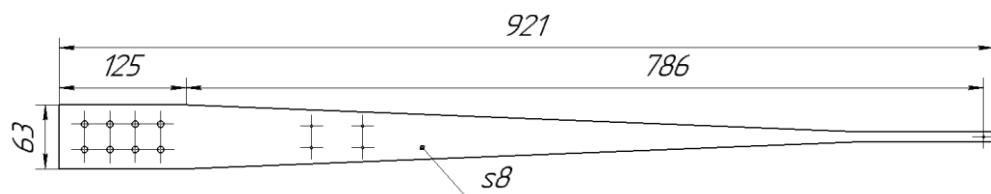
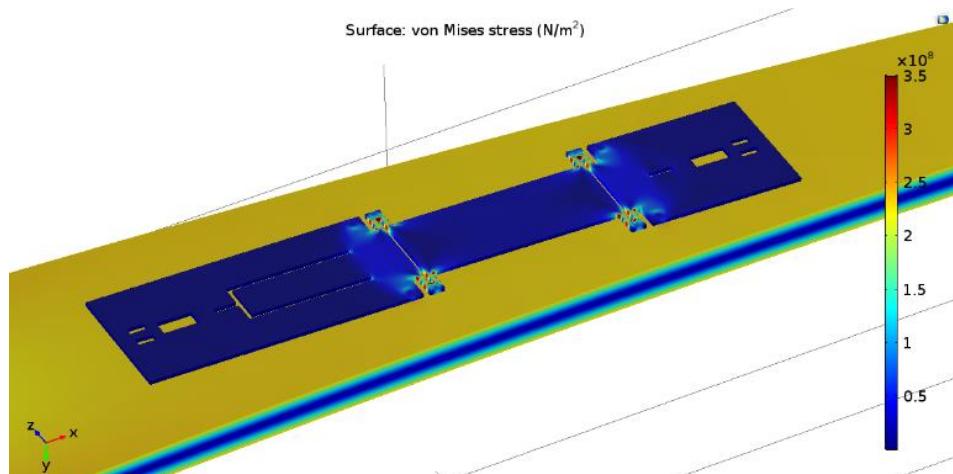


Рис. 3. Чертеж балки равного сопротивления изгибу

**Математическое моделирование деформации чувствительного элемента.** Для расчета деформации и механического напряжения, возникающих в испытуемом прототипе тензометрического датчика была создана модель в пакете программ Comsol Multiphysics, с применением модуля Solid Mechanics. В рамках данной модели изгибающая пластина жестко закреплена. На ее свободном конце размещается инертная масса, испытывающая отклонения при внешнем воздействии. Также, тензометрический датчик фиксируется с верхней стороны кронштейна (рис. 4).

Рис. 4. Пример визуализации рассчитанного распределения механических напряжений (масса груза  $m=20$  кг)

Целью моделирования являлась оценка деформации датчика в месте крепления ВБР под воздействием внешних растягивающих сил различной величины. Параметры балки выбирались исходя из чертежа изделия (рис. 3), материал упругой пластины – сталь с модулем Юнга 210 ГПа, толщиной 8 мм. Параметры тензометра выбирались исходя из чертежа изделия (рис. 2).

Из данного моделирования был получен график зависимости величины деформации в зависимости от прикладываемой нагрузки (рис. 5).

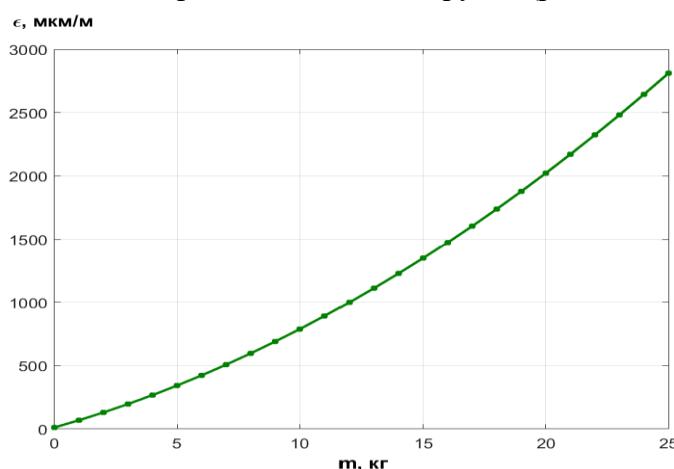


Рис. 5. Зависимость величины деформации балки от приложенной нагрузки

Полученные в ходе математического моделирования результаты позволяют сделать выводы о том, что деформация датчика, зафиксированного на изгибаемой пластине, увеличивается при увеличении нагрузки.

**Экспериментальные результаты.** Исходя из зависимости величины деформации от приложенной нагрузки, построенной по результатам моделирования и, полученных в ходе эксперимента зависимостей сдвига центральной длины волны от приложенной нагрузки, были получены зависимости сдвига центральной длины волны от деформации (рис. 6).

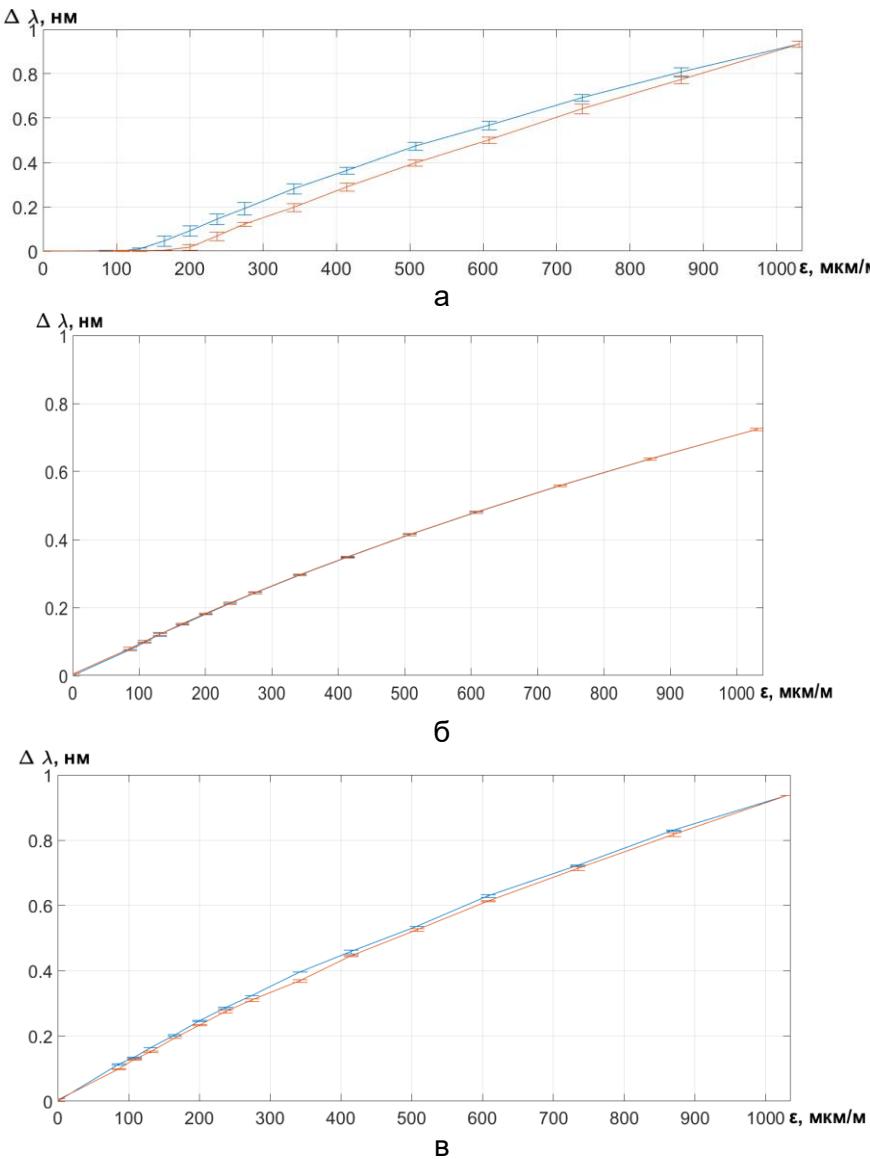


Рис. 6. Зависимость сдвига центральной длины волны ВБР от величины удлинения: болтовое соединение (а); kleевое соединение напрямую с балкой равного сопротивления изгибу (б); сварное соединение (в)

Построены графики зависимости сдвига центральной длины волны от величины удлинения при нагрузке (синяя линия) и снятии нагрузки (красная линия) для ВБР, закрепленных на балке равного сопротивления изгибу при помощи: болтового соединения оснастки датчика с балкой равного сопротивления изгибу: (рис. 6, а), kleевого соединения ВБР напрямую с балкой равного сопротивления изгибу (рис. 6, б), сварного соединения оснастки датчика с балкой равного сопротивления изгибу (рис. 6, в).

**Заключение.** Таким образом, испытания ВБР, приклеенной напрямую к балке равного сопротивления, а также испытание чувствительного элемента на основе ВБР, закрепленного на балке равного сопротивления при помощи сварного соединения показали возможность использования в качестве тензометра, как самой волоконной решетки Брэгга, так и различные конструкции чувствительных элементов на основе решеток.

В продолжение работы планируется добиться повышения точностных характеристик тензометра путем проведения дальнейших испытаний с измененными характеристиками используемых ВБР, а также kleевых смесей.

### **Литература**

1. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики / Пер. с японского. – Л.: Энергоатомиздат. Лен. отдел., 1990. – 256 с.
2. Shizhuo Y., Ruffin P.B., Francis T.S. Optical Science and Engineering (Book 132). – CRC Press. Second Edition. – 2008. – 496 p.
3. Frazão O., Ferreira L.A., Araújo F.M., Santos J.L. Applications of Fiber Optic Grating Technology to Multi-Parameter Measurement // Fiber and Integrated Optics. – 2005. – V. 24. – P. 227–244.
4. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решетки. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.
5. Zhang S., Liu Y. Fabrication of FBG strain gauge used for high temperature strain monitoring // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 668-669. – P. 920–923.
6. Cai Q., Liu Y., He Z., Chen Z., Huang C., Lou J., Tian W. Research on the FBG strain gauge used for the safety monitoring of high temperature pressure pipes // Society of Photo-optical Instrumentation Engineers. – 2012. – V. 8418.
7. Ren L., Chen J., Li H.-N., Song G., Ji X. Design and application of a fiber Bragg grating strain sensor with enhanced sensitivity in the small-scale dam model // Smart Mater. Struct. – 2009. – V. 18. – № 035015. – 7 p.

УДК 681.586.5

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С МАССИВОМ  
ЧИРПИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА  
ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ И ИЗГИБОВ  
ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ**

Егорова Д.А.<sup>1</sup>, Куликов А.В.<sup>1</sup>, Лавров В.С.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.т.н., доцент Куликов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрено создание волоконно-оптической измерительной системы на основе многосердцевинного оптического волокна с массивом чирпированных волоконных решеток Брэгга. Суть метода исследования сводится к установке зависимости изменения периода решетки в каждой сердцевине от радиуса изгиба волокна, что позволит определить изгибы протяженных объектов в пространстве. Представлена геометрия многосердцевинного волокна и компьютерная модель участка световода с заданным радиусом изгиба. Приведены оптическая схема эксперимента и спектры отражения от волоконных брэгговских решеток в каждой сердцевине волоконного световода до и после его изгиба. Проведен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** волоконный световод, массив чирпированных волоконных брэгговских решеток, многосердцевинное оптическое волокно, волоконно-оптическая измерительная система.

**Введение.** В настоящее время разработка и создание измерительной системы для определения и контроля положения и изгибов протяженных объектов в пространстве вызывает большой научный и практический интерес. На данный момент различают два типа таких датчиков: традиционные и волоконно-оптические. Традиционные разделяются на контактные (самочувствительные поверхности) и бесконтактные системы. К бесконтактным системам можно отнести камеры, радиолокационные станции, лидары. Однако на производительность и целостность данных таких измерительных систем оказывают большое влияние температура и загрязнение окружающей среды [1, 2]. Кроме этого, возникает необходимость определения изгибов и формы динамических объектов удаленно, без визуального контакта и в реальном времени. В некоторых задачах требуется гибкие и малогабаритные чувствительные элементы, непосредственно закрепленные или встроенные в объект, для определения формы, кривизны или скручивания [3, 4]. Волоконно-оптические измерительные системы (ВОИС) позволяют решить поставленные задачи и находят применение в медицине (контроль положения малоинвазивных хирургических устройств и инструментов, введенных в организм человека [5, 6]), аэрокосмической отрасли (мониторинг во время полета развертываемых конструкций), энергетике (измерение формы лопасти на ветровых турбинах для управления ими в реальном времени) и др.

ВОИС для дистанционного определения положения и изгибов протяженных объектов в пространстве реализуется на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), записанных по всей длине волоконного световода [7]. Анализируя спектры отражения от ВБР на одном участке волокна, можно определить относительные уровни деформации волоконного световода [8].

**Модель.** В настоящей работе ВОИС реализуется на основе чирпированных ВБР, записанных в многосердцевинное оптическое волокно. Внешний диаметр многосердцевинного оптического волокна составляет 125 мкм. Волокно содержит семь сердцевин с диаметром 5 мкм, которые имеют гексагональное расположение. Расстояние между сердцевинами составляет 35 мкм. Кроме этого, волокно скручено в процессе вытяжки с шагом скрутки 20 мм. На рис. 1, а показан торец данного волокна.

Для построения модели волокна с изгибом была выбрана программная среда COMSOL Multiphysics. Модель представляет собой участок волокна длиной 10 мм с параметрическими кривыми, симметрично расположенными в центре каждой сердцевины. В каждой параметрической кривой создано распределение точек. Задавая радиус изгиба волокна (рис. 1, а), возможно определить смещение каждой точки кривой относительно начального положения.

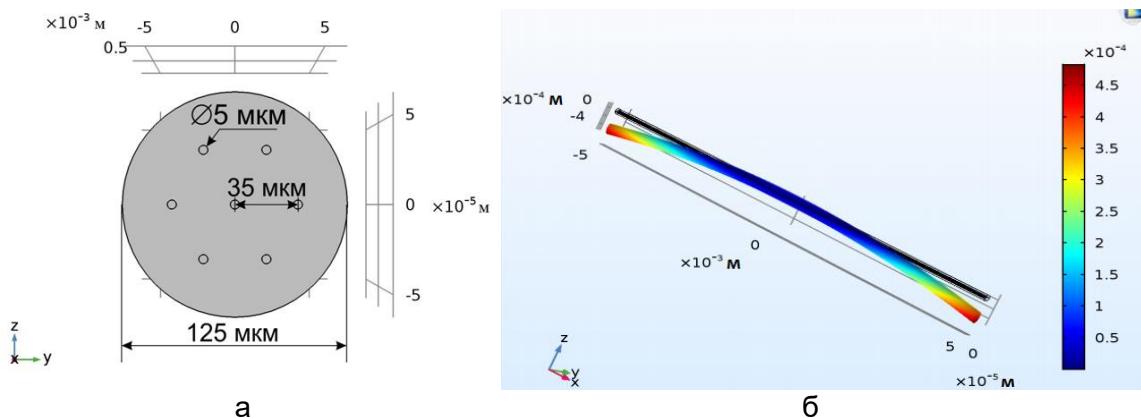


Рис. 1. Моделирование многосердцевинного волокна: торец волокна (а); модель волокна с радиусом изгиба 30 мм в COMSOL Multiphysics (б)

График изменения длины сердцевин с радиусом изгиба 30 мм представлен на рис. 2. Полученные данные по удлинению каждой из сердцевин используются в модели для построения спектра отражения от чирпированной решетки, тем самым возможно установить зависимость изменения периода решетки от величины изгиба, и, следовательно, сдвига длины волны Брэгга в спектре отражения, что позволит удаленно восстановить траекторию укладки волоконного световода в пространстве.

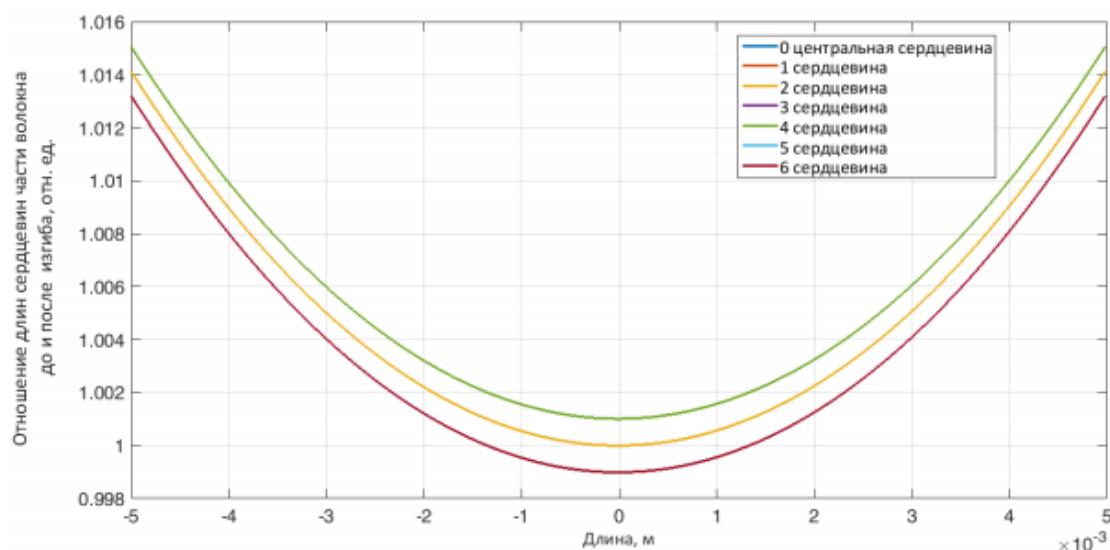


Рис. 2. Изменение длин сердцевин отрезка волокна с заданным изгибом (радиус 30 мм)

**Эксперимент.** В работе объектом экспериментальных исследований является участок многосердцевинного оптического волокна с массивом чирпированных ВБР, записанных с помощью интерферометра Тальбота [9]. В волокне был записан массив из двенадцати 10 мм решеток. Положение решетки по длине волокна отмечалось после записи. В процессе записи каждой последующей решетки изменялся период интерференционной картины посредством поворота зеркал интерферометра, а, следовательно, и центральная длина волны отражения ВБР, таким образом, каждой

решетке соответствует свой спектр отражения. Для эксперимента была собрана оптическая схема, представленная на рис. 3.

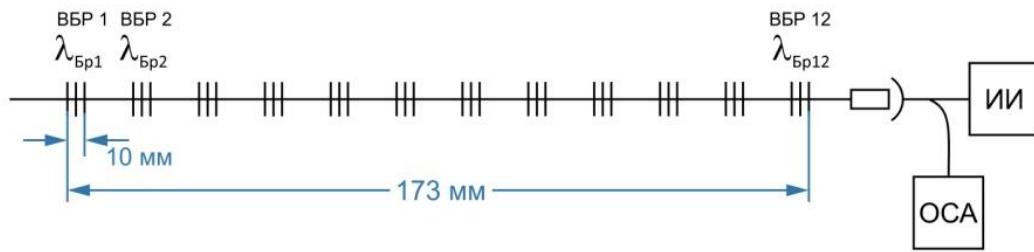


Рис. 3. Оптическая схема эксперимента

Многосердцевинное оптическое волокно укладывалось в форму (рис. 4). Радиусы изгиба составили 90, 70, 50 и 30 мм. Ввод оптического излучения реализовывался с помощью сварочного аппарата для оптоволокна Fujikura FSM-100M/P. С помощью моторизированных подвижек и камер в сварочном аппарате производиласьстыковка одномодового оптического волокна с каждой сердцевиной многосердцевинного волокна. Оптическое излучение от широкополосного источника вводилось последовательно в каждую сердцевину, и фиксировались спектры отражения на спектроанализаторе до изгиба волокна и после для каждой сердцевины.

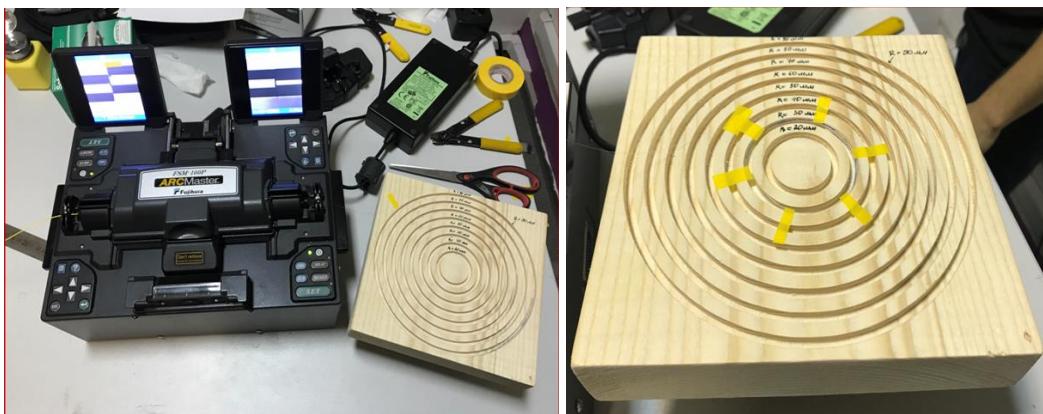


Рис. 4. Стыковка торцов волокон и укладка многосердцевинного волокна

На рис. 5 приведен участок из спектра отражения от массива ВБР для каждой сердцевины с радиусом изгиба волоконного световода 30 мм.

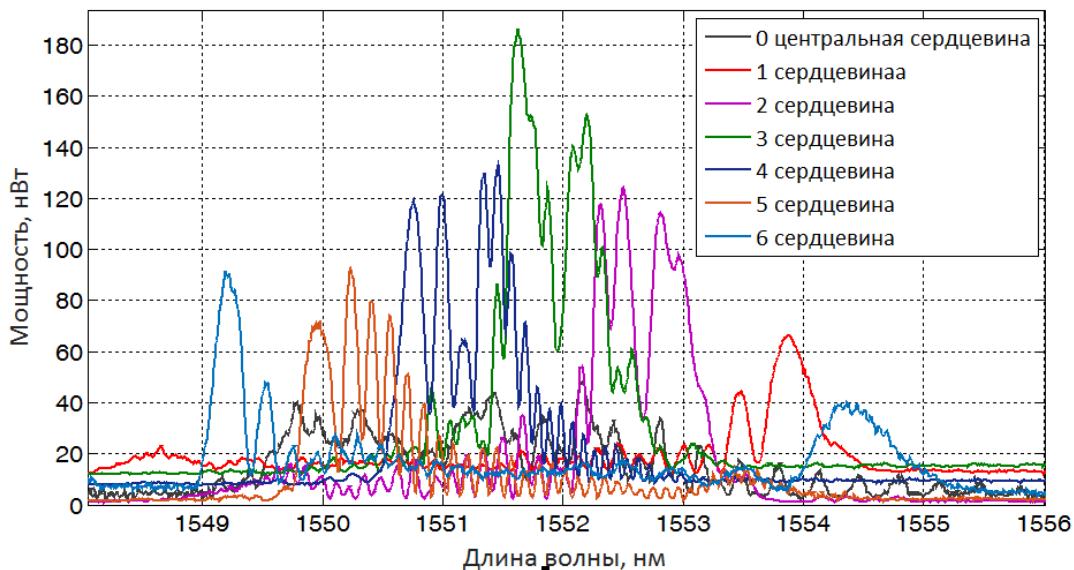


Рис. 5. Участок спектра отражения от чирпированных ВБР

**Результаты.** В ходе эксперимента были получены массивы данных спектров отражения от ВБР в многосердцевинном волокне. На графиках, приведенных на рис. 5, наблюдаются изменения в спектрах отражения для каждой сердцевины волокна, причем происходит как сдвиг длин волн спектра, так и уширение/сжатие формы спектра в зависимости от расположения сердцевин относительно изгиба.

Для обработки данных была использована программная среда Matlab. Сравнительный анализ проводился для участка спектра отражения для каждой сердцевины волокна в покое и при изгибе 90° (рис. 6, а). Анализ данных показал, что центральная сердцевина (0) остается нечувствительной к изгибам и служит опорной, при этом происходит уширение или сжатие спектра для остальных сердцевин в зависимости от положения ВБР относительно изгиба. Зависимость коэффициента уширения спектра ВБР представлена на рис. 6, б. Из приведенной зависимости возможно определить расположение сердцевин с решетками в пространстве, учитывая шаг скрутки. Это связано с тем, что решетка на внутренней стороне изгиба волокна будет испытывать сжатие, что приводит к уменьшению периода решетки, в то время как на внешней – растяжение, и, соответственно, увеличение периода.

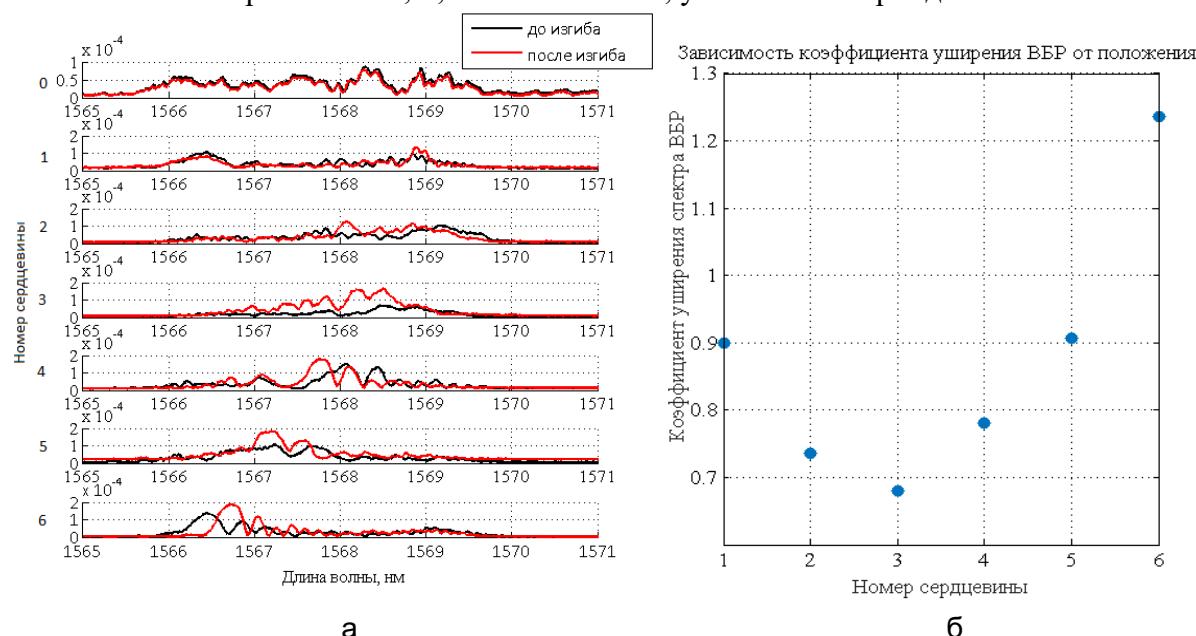


Рис. 6. Участок спектра отражения от чирпированных ВБР (а); зависимость коэффициента уширения от положения ВБР (б)

**Заключение.** В работе проведено исследование по созданию ВОИС с массивом чирпированных ВБР для дистанционного определения положения и изгибов протяженных объектов в пространстве. Построена модель участка многосердцевинного волокна. Полученные данные по удлинению каждой из сердцевин будут использованы для построения математической модели спектра отражения для установления зависимости изменения периода решетки от величины изгиба.

Результаты экспериментального исследования показали, что волокно чувствительно к изгибам, и прослеживается закономерность в изменении длин волн в спектрах отражения от ВБР, а дальнейшая обработка результатов позволит определить радиус изгиба без использования методов частотной оптической рефлектометрии, что приведет к уменьшению стоимости измерительной системы. Кроме этого, создание волоконно-оптических датчиков с массивом чирпированных ВБР для определения положения и изгибов объектов ранее не рассматривалось.

**Литература**

1. Phillips T., Guenther N., McAree P.R. When the Dust Settles: the four behaviors of LiDAR in the Presence of Fine Airborne Particulates // *J. Field Rob.* – 2017. – V. 34. – P. 985–1009.
2. Phillips T., Hahn M., McAree R. An evaluation of ranging sensor performance for mining automation applications, *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* // *IEEE/ASME International Conference*. – 2013. – P. 1284–1289.
3. Durr N., González G., Parot V. 3D imaging techniques for improved colonoscopy // *Expert Rev. Med.* – 2014. – V. 11. – P. 105–107.
4. Lally E., Reaves M., Horrell E., Klute S., Froggatt M.E. Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures // *SPIE Smart Structures and Materials+Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. – 2012. – V. 8345. – P. 83452Y–83452Y.
5. Zhang L., Qian J., Zhang Y., Shen L. On SDM/WDM FBG sensor net for shape detection of endoscope // *IEEE International Conference Mechatronics and Automation*. – 2005. – V. 4. – P. 1986–1991.
6. Parent F., Loranger S., Mandal K. Enhancement of accuracy in shape sensing of surgical needles using optical frequency domain reflectometry in optical fibers // *Biomedical Optics Express*. – 2017. – V. 8. – P. 2210–2221.
7. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. – 2nd ed. – Elsevier, 2010. – 632 p.
8. Moore J., Rogge M. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions // *Opt. Express*. – 2012. – V. 20. – P. 2967–2973.
9. Gribaev A., Pavlishin I., Stam A., Idrisov R., Varzhel S., Konnov K. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Opt. Quant. Electron.* – 2016. – V. 48. – P. 1–7.

УДК 535.417

**ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ ТЕРАПИИ****Жихорева А.А.<sup>1,2</sup>, Белашов А.В.<sup>1,2</sup>, Романов В.А.<sup>3</sup>, Семенов А.Л.<sup>3</sup>, Жилинская Н.Т.<sup>3</sup>,  
Беспалов В.Г.<sup>3</sup>, Семенова И.В.<sup>1</sup>, Васютинский О.С.<sup>1</sup>****Научный руководитель – н.с. Семенова И.В.<sup>1</sup>****<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе; <sup>2</sup>Университет ИТМО;****<sup>3</sup>НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова**

Работа посвящена исследованию изменений оптических и морфологических характеристик опухолевых клеток крыс линии Wistar в результате химиотерапии препаратами Диоксадэт и Цисплатин. Основным методом исследования являлась цифровая голограммическая микроскопия. Исследованы изменения среднего фазового набега эритроцитов и опухолевых клеток до и после химиотерапии. Проведено сравнение эффективности исследуемых препаратов на основе статистического анализа распределения среднего фазового набега клеток. Показано, что химиотерапия препаратом Диоксадэт вызывает более выраженное изменение морфологических и оптических параметров опухолевых клеток.

**Ключевые слова:** цифровая голограммическая микроскопия, Диоксадэт, Цисплатин, морфология клеток, химиотерапия, фотодинамическое воздействие.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00364.

**Введение.** Лечение онкологических заболеваний является одним из приоритетных направлений развития медицины и биологии. Для апробации различных методов терапии часто используют модели перевиваемого штамма у половозрелых лабораторных крыс линии Wistar [1]. Анализ эффективности применяемых методов лечения проводится на цитологических образцах крыс, прошедших курс лечения исследуемыми препаратами, такими как, например, Диоксадэт и Цисплатин. Однако, исследование фиксированных цитологических образцов проводится, как правило, только с помощью оптической микроскопии, которая не позволяет дать численные оценки морфологических характеристик клеточных структур.

Методы цифровой голограммы позволяют восстановить форму волнового фронта, благодаря анализу картины интерференции опорной и предметной волн. Используя эти бесконтактные оптические методы, можно получить информацию об изменении фазового набега волнового фронта, прошедшего через клетки, что позволяет вычислить интегральный показатель преломления в различных клеточных структурах, толщину и объем клетки, площадь плазматической мембранны и сухую массу клетки [2]. Также данные методы позволяют проводить численное сравнение морфологических характеристик при лечении различными препаратами и как следствие дать оценку эффективности исследуемых препаратов.

В данной работе проводился сравнительный анализ эффективности противоопухолевых препаратов Диоксадэт и Цисплатин методами цифровой голограммической микроскопии. Исследовались морфологические и оптические параметры клеток крыс линии Wistar до терапии и после терапии исследуемыми препаратами. Эксперимент проводился на модели перевиваемого штамма рака яичников у половозрелых самок лабораторных крыс линии Wistar [1].

**Образцы.** В ходе подготовки биологических образцов у половозрелых самок лабораторных крыс линии Wistar моделировалась IV стадия рака яичника. Материалом для цитологического исследования служили мазки асцитической жидкости лабораторных крыс, подвергшихся химиотерапии двумя препаратами Диоксадэт и

Цисплатин. В качестве контрольного образца был проведен забор асцитической жидкости у крысы, не подвергавшейся лечению и находившейся в тех же условиях жизнеобеспечения.

**Экспериментальные установки.** Фиксированные неокрашенные цитологические образцы исследовались методами голограммической микроскопии. Для этого использовался голограммический микроскоп, основанный на интерферометре Маха-Цандера. Параллельно с этим мазки асцитической жидкости лабораторных крыс наблюдались на томографическом голограммическом микроскопе 3D Cell Explorer (Nanolive). Применение бесконтактных голограммических методов исследования позволяют вычислить морфологические характеристики клеточных структур, например, объем, толщина, площадь мембранны, а также численно найти такие параметры как: показатель преломления, сухая масса и средний фазовый набег клеточных структур [2]. Анализ различных параметров, которые отображают не только морфологические изменения, но оптические свойства клеточных структур, позволяют проводить более полный сравнительный анализ эффективности исследуемых препаратов.

Для получения численных оценок оптических параметров в работе использовался цифровой голограммический микроскоп, основанный на интерферометре Маха-Цандера. Регистрация интерференционной картины двух когерентных волн: опорной и предметной, прошедшей через цитологический образец, осуществлялась на ПЗС-матрице цифровой камеры с глобальным затвором. В ходе восстановления голограммического изображения численными методами, основанными на Фурье-анализе, можно получить пространственное распределение фазового набега [3]. Последующий численный анализ позволяет определить средний интегральный фазовый набег клеток.

Для исследования морфологических параметров клеток проводилась регистрация трехмерных фазовых изображений клеточных структур с помощью томографического голограммического микроскопа 3D Cell Explorer (Nanolive). При численной обработке таких трехмерных изображений можно определить ряд морфологических характеристик, не доступных при использовании оптического микроскопа: площадь мембранны, площадь проекции и объем клеток.

**Результаты.** Полученные изображения клеток на цифровом голограммическом и на томографическом микроскопах представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

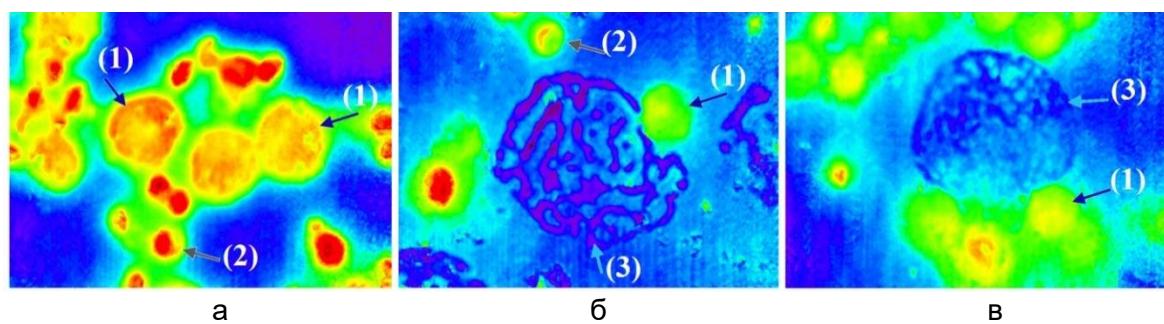


Рис. 1. Фазовые изображения клеток, полученные с помощью цифрового голограммического микроскопа: контрольный образец (а); Диоксадэт (б) и Цисплатин (в).

1 – клетки карциномы яичников; 2 – эритроциты; 3 – фрагментированные клетки карциномы яичников

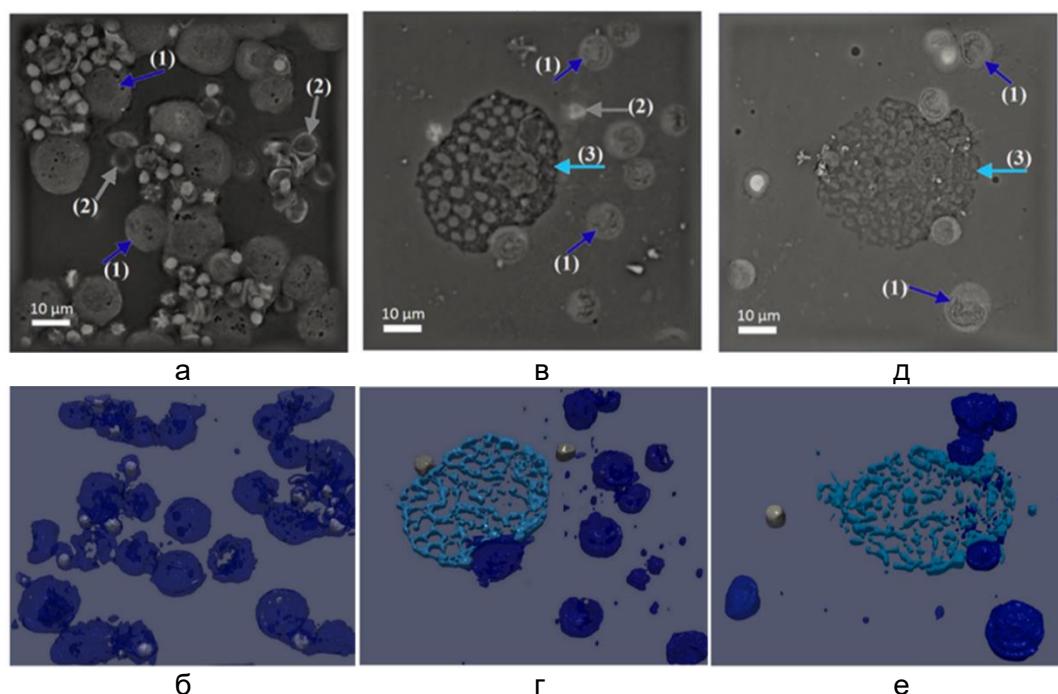


Рис. 2. Типичные двух- и трехмерные изображения клеток, полученные на голограммическом томографическом микроскопе: контрольный образец (а, б); Диоксадэт (в, г) и Цисплатин (д, е). 1 – клетки карциномы яичников; 2 – эритроциты; 3 – фрагментированные клетки карциномы

Четко видно, что в асцитической жидкости в контрольном образце присутствуют два вида клеток, а в образцах крыс, прошедших химиотерапию 3. В работе условно выделены группы эритроцитов и клеток яичников, часть из которых после химиотерапии повреждается фрагментацией. Виды клеток разделялись по морфологическим признакам, так эритроциты, отличаются дисковидной двояковогнутой формой, что хорошо видно на фазовых изображениях клеток (рис. 1, б 2), и характерными размерами, которые значительно (в 2–4 раза) меньше опухолевых клеток яичников. В образцах асцитической жидкости крыс, прошедших химиотерапию, наблюдаются фрагментированные клетки, которых нет в контрольном образце. По морфологическим характеристикам эти клетки похожи на клетки, погибшие путем митотической катастрофы [4].

После численной обработки цифровых голограмм по восстановленным фазовым распределениям проводилось накопление данных о среднем фазовом набеге каждого вида клеток в каждом из образцов. Полученные статистические распределения по 40–80 клеткам представлены на рис. 3. Четко видно, что клетки различимы не только по морфологическим признакам, но и по среднему фазовому набегу клеточных структур.

Стоит отметить уменьшение фазового набега в клеточных структурах при лечении препаратами Диоксадетом и Цисплатином по сравнению с контрольным образцом, а также существенное различие величины оптической толщины клеток для образцов Диоксадэт и Цисплатин. Значение среднего фазового набега в различные временные срезы может косвенно служить параметром жизнеспособности клеток. Как было показано в статьях [2] при некрозе различных типов клеток происходит значительное уменьшение среднего фазового сдвига. Статистически значимое различие в среднем фазовом набеге в образцах Диоксаден и Цисплатин может доказывать более высокую эффективность препарата Диоксаден.

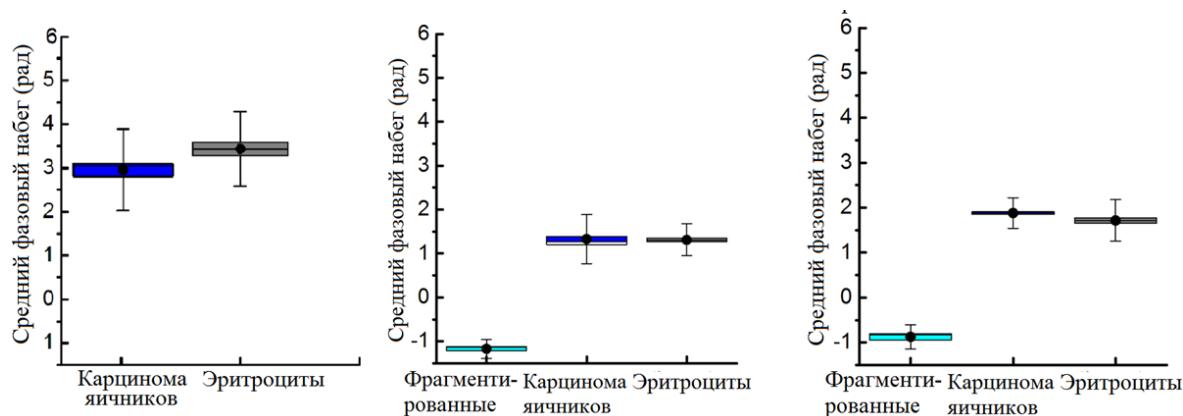


Рис. 3. Графики распределения среднего фазового набега клеток: контрольный образец (а); образца, взятого у крыс, прошедших химиотерапию препаратом Диоксадэт (б); Цисплатин (в)

Исследование морфологических характеристик проводилось с помощью томографического микроскопа Nanolive. По полученным трехмерным изображениям численно находились значения объема, площади проекции и площади мембраны клеток яичников. Для каждого вида клеток в трех типах образцов были накоплены данные по 20–30 клеткам.

После химиотерапии происходит значительное уменьшение рассматриваемых параметров, что наглядно видно рис. 4.

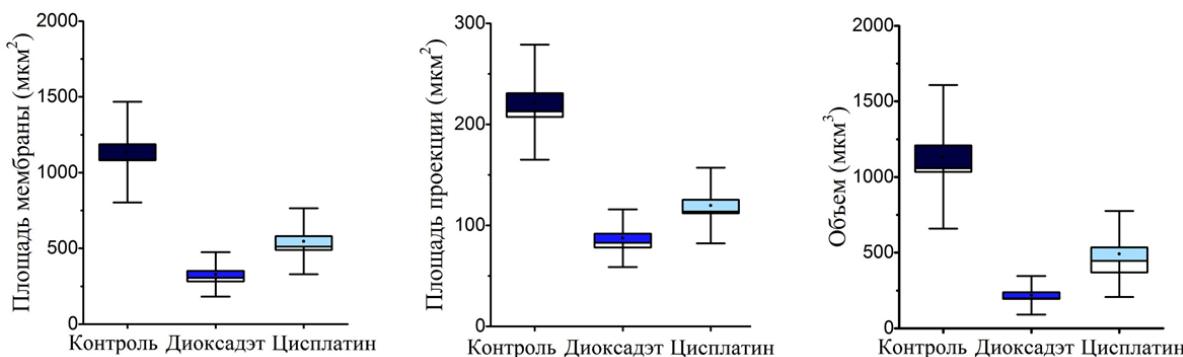


Рис. 4. Графики распределения морфологических параметров клеток карциномы яичников: площадь мембранны (а); площадь проекции (б); объема (в)

Но при воздействии препаратом Диоксадэт изменение объема и площади мембраны более выражено, что подтверждает более агрессивное воздействие на клетки данного препарата.

**Заключение.** Было показано, что после химиотерапии происходит значительное уменьшение рассматриваемых морфологических параметров. Стоит отметить, что после воздействия как Диоксадэтом, так и Цисплатином средний фазовый набег опухолевых клеток уменьшается. Однако, при терапии Диоксадэтом средний фазовый набег клеток становится меньше, чем при лечении Цисплатином, что косвенно может служить показателем меньшей жизнеспособности опухолевых клеток при лечении этим препаратом. Кроме того, при воздействии препаратом Диоксадэт изменение объема и площади мембранны более выражено, что также подтверждает более агрессивное воздействие данного препарата на клетки опухоли. Таким образом, проведенное исследование морфологических и оптических параметров методами цифровой голографической микроскопии, позволяет судить о большей эффективности препарата Диоксадэт.

**Литература**

1. Bespalov V.G., Kireeva G.S., Belyaeva O.A., Senchik K.Y. Experimental study of antitumour activity and effects on leukocyte count of intraperitoneal administration and hyperthermic intraperitoneal chemoperfusion (HIPEC) with dioxadet in a rat model of ovarian cancer // Journal of Chemotherapy. – 2016. – V. 28. – № 3. – P. 203–209.
2. Belashov A.V., Zhikhoreva A.A., Belyaeva T.N., Kornilova E.S., Petrov N.V. Digital holographic microscopy in label-free analysis of cultured cells' response to photodynamic treatment // Optics letters. – 2016. – V. 41. – № 21. – P. 5035–5038.
3. Kreis T. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method // J OSA A. – 1986. – V. 3. – № 6. – P. 847–855.
4. Манских В.Н. Пути гибели клетки и их биологическое значение // Цитология. – 2007. – Т. 49. – № 11. – С. 909–915.

УДК 621.375.8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВНУТРЕННЕГО БЛОКА ПОДВОДНОГО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ЭРБИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ****Залесская Ю.К.<sup>1</sup>, Кикилич Н.Е.<sup>1</sup>, Виноградов А.В.<sup>1</sup>, Алейник А.А.<sup>1</sup>****Научный руководитель – к.т.н., доцент Алейник А.А.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены практические аспекты в области разработки подводных телекоммуникационных эрбиевых оптических усилителей. В программе “GainMaster” создана структурная схема внутреннего блока подводного телекоммуникационного эрбиевого оптического усилителя. Проведено исследование структурной схемы внутреннего блока подводного телекоммуникационного эрбиевого усилителя. Задачами текущего исследования являются получение зависимостей среднего значения усиления и среднего значения уровня шумов, значения неравномерности коэффициента усиления и абсолютного значения выходной мощности от длины оптического волокна при различной мощности входного сигнала для схемы внутреннего блока подводного телекоммуникационного эрбиевого усилителя с двунаправленной накачкой.

**Ключевые слова:** эрбиевый усилитель, эрбиевое оптическое волокно, спектральная чувствительность, коэффициент шума.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) в настоящее время применяются в сетях различного масштаба: на их основе построены магистральные, региональные (областные), городские и трансконтинентальные линии связи [1]. Вносимые потери в ВОЛС составляют 10–20 дБ на каждые 50–100 км, поэтому в протяженных линиях связи необходимо устанавливать устройство для усиления сигнала. В 1985–1990 годах были проведены исследования, которые привели к появлению эрбиевых усилителей (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA). Усилители на оптическом волокне (ОВ), легированном ионами эрбия (Er-doped fiber), сочетают в себе такие свойства, как отсутствие необходимости преобразования оптического сигнала в электрический и совпадение спектральной области усиления эрбиевого волокна с областью третьего окна прозрачности ОВ [2, 3].

В настоящее время подводные ВОЛС имеют протяженность более 300000 км и обеспечивают связь между 90 странами. К подводным эрбиевым усилителям предъявляются особенные требования, такие как повышенная температурная стабильность, повышенная механическая прочность и способность выдерживать давление воды – до 75 МПа. На все компоненты ВОЛС, эксплуатирующиеся под водой, налагаются повышенные требования по надежности, качеству производства, и сроку эксплуатации (25–30 лет). К конструкции корпуса подводного телекоммуникационного эрбиевого усилителя предъявляются повышенные требования [4]: устойчивость к коррозии; устойчивость к давлению воды; полная герметичность соединений; защита от перепадов тока и напряжения; ударная и вибрационная устойчивость; длительный срок службы.

Основными элементами эрбиевого усилителя являются активное эрбиевое волокно, лазерный диод накачки (ЛДН) и оптический разветвитель [5]. Максимальная эффективность накачки эрбиевого волокна достигается на длинах волн 980 нм (11 дБ/мВт) и 1480 нм (6,3 дБ/мВт). Накачку возможно осуществлять в прямом и обратном направлении по отношению к направлению сигнала. Существует также двунаправленная накачка, при которой ОВ накачивается с двух сторон одновременно. Двунаправленная накачка позволяет использовать два источника накачки, при этом повышая суммарную мощность накачки, а также стабильность выходных параметров

такого усилителя, за счет более равномерного распределения излучения накачки по длине ОВ [6].

Накачка эрбииевого волокна на длине волны 1480 нм позволяет обеспечить максимальную энергетическую эффективность (86%), так как накачка на длине волны 1480 нм производится с максимальной квантовой эффективностью (91%), в отличие от излучения на длине волны 980 нм (55% и 86% соответственно). Накачка эрбииевого волокна излучением на длине волны 980 нм позволяет обеспечить полную инверсную населенность ионов эрбия в сетке кварцевого стекла, в то время как излучение на длине волны 1480 нм не позволяет достичь полной инверсии населенности ионов эрбия в сетке кварцевого стекла. Для получения высокой эффективности для накачки эрбииевого усилителя целесообразно использовать излучение на длине волны 1480 нм, а накачка на длине волны 980 нм обеспечивает меньшее значение шума. Обычно для противонаправленной накачки используется лазерный диод с длиной волны 1480 нм, а для сонаправленной накачки – 980 нм [1].

Одной из проблем при создании эрбииевых усилителей является возникновение узкополосной лазерной генерации из-за обратных отражений от торца ОВ и от подключенных оптических устройств, поэтому на его вход и выход устанавливается волоконно-оптический изолятор, который имеет окно пропускания в области отличной от длин волн накачки [7, 8].

Одним из основных требований, предъявляемых к конструкции внутреннего блока подводного телекоммуникационного эрбииевого оптического усилителя (ВБПТЭОУ), является длительный срок бесперебойной работы системы. Наиболее ненадежными компонентами схемы являются ЛДН, поэтому в подводных телекоммуникационных эрбииевых оптических усилителях ЛДН дублируются.

Типовая схема подводного телекоммуникационного эрбииевого оптического двунаправленного усилителя представлена на рис. 1.

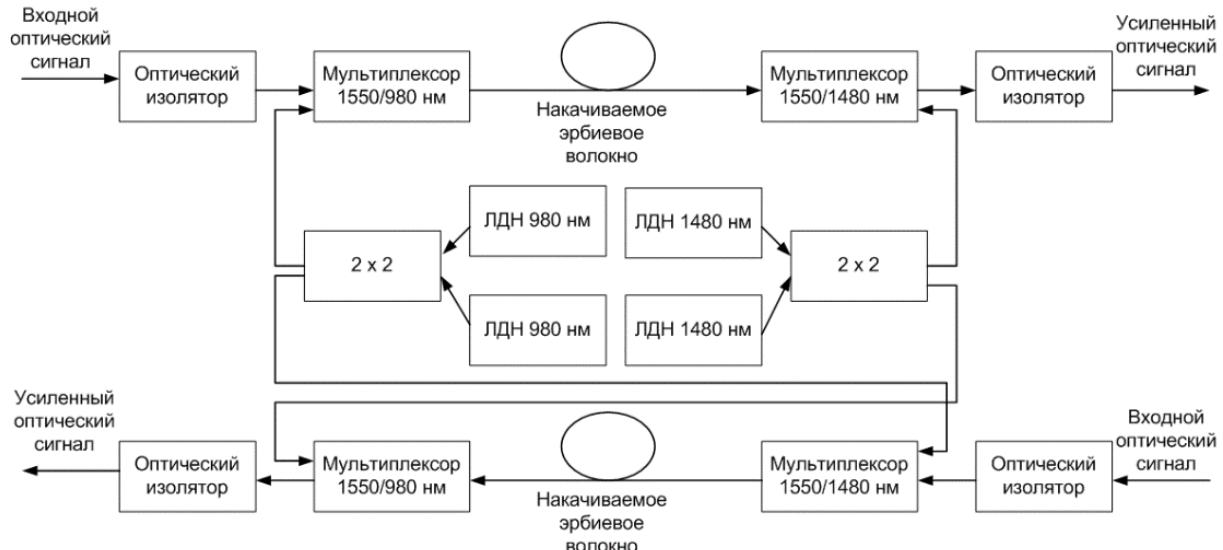


Рис. 1. Схема подводного телекоммуникационного эрбииевого оптического двунаправленного усилителя

Данная схема функционирует следующим образом – при воздействии излучения накачки от двух ЛДН, работающих на длинах волн 980 нм и 1480 нм, вводимого в активное эрбииевое волокно при помощи мультиплексоров, происходит усиление оптического сигнала, поступающего на вход схемы, в спектральной области 1,5–1,6 мкм.

Для линеаризации характеристики усиления таких усилителей используются спектральные фильтры, которые могут существенно снижать КПД устройства, поэтому

при отсутствии необходимости работы в широком спектральном диапазоне, к примеру для усиления нескольких каналов DWDM, необходимо внимательно подходить к выбору рабочей спектральной области. Для выбора рабочей спектральной области усиления данной схемы была исследована спектральная зависимость значения усиления эрбииевых волокон. Для данной схемы был выбран диапазон длин волн 1546–1557 нм. В этом спектральном диапазоне у эрбииевых волокон наиболее линейная характеристика усиления. На рис. 2 приведена типичная характеристика усиления эрбииевых волокон, область наиболее линейного участка характеристики выделена маркером. В данной работе применены эрбииевые волокна I-4 и I-25 производства компании Fibercore.

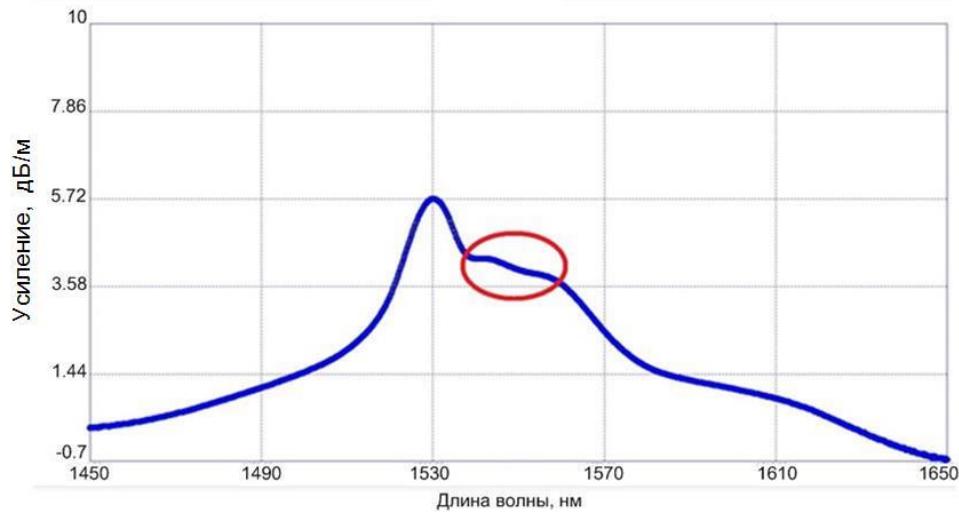


Рис. 2. Типичная характеристика усиления эрбииевых волокон

Для выбора типа эрбииевого волокна и его оптимальной длины, при которых будет достигнута максимальная равномерность коэффициента усиления и минимальный уровень шума, а величина коэффициента усиления малого сигнала (–30 дБм) будет иметь значение от 30 дБ, было проведено моделирование схемы ВБПТЭОУ в программе «GainMaster» компании Fibercore (рис. 3).

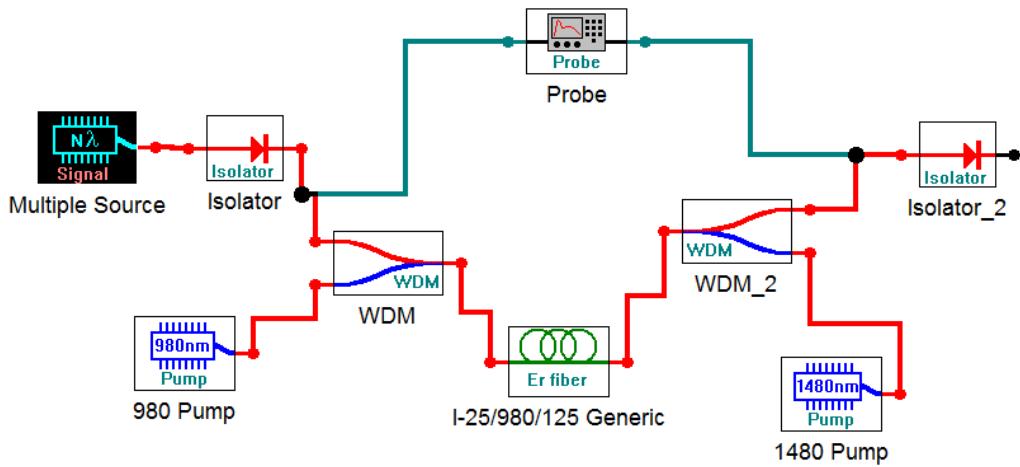


Рис. 3. Схема блока оптического усилителя в программе «Gainmaster»

В данном типе усилителей диапазон значений мощности излучения источника сигнала должен составлять от –30 дБм до +5 дБм, что соответствует значениям от 1 мкВт до 3 мВт. Исходя из характеристики усиления эрбииевых волокон был выбран диапазон длин волн 1546–1557 нм, что соответствует 25–38 каналам стандартной сетки ITU-T (С-диапазон). В качестве активных волокон были взяты ОВ I-25 и ОВ I-4, производства компании Fibercore.

Для значений мощности входного сигнала 1 мкВт, 100 мкВт, 1 мВт и 3 мВт получены зависимости среднего значения усиления и уровня шума ВБПТЭОУ в дБ от длины ОВ для двух типов эрбиевых волокон: I-4 и I-25 (рис. 4 и 5).

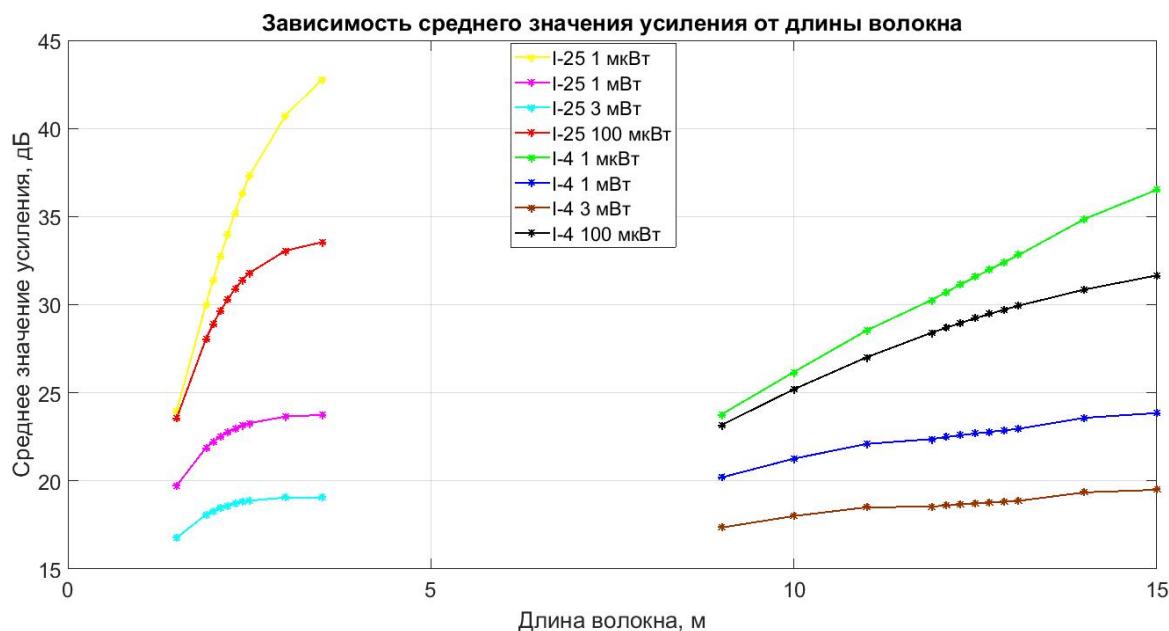


Рис. 4. Зависимости среднего значения усиления ВБПТЭОУ от длины ОВ I-4 и I-25

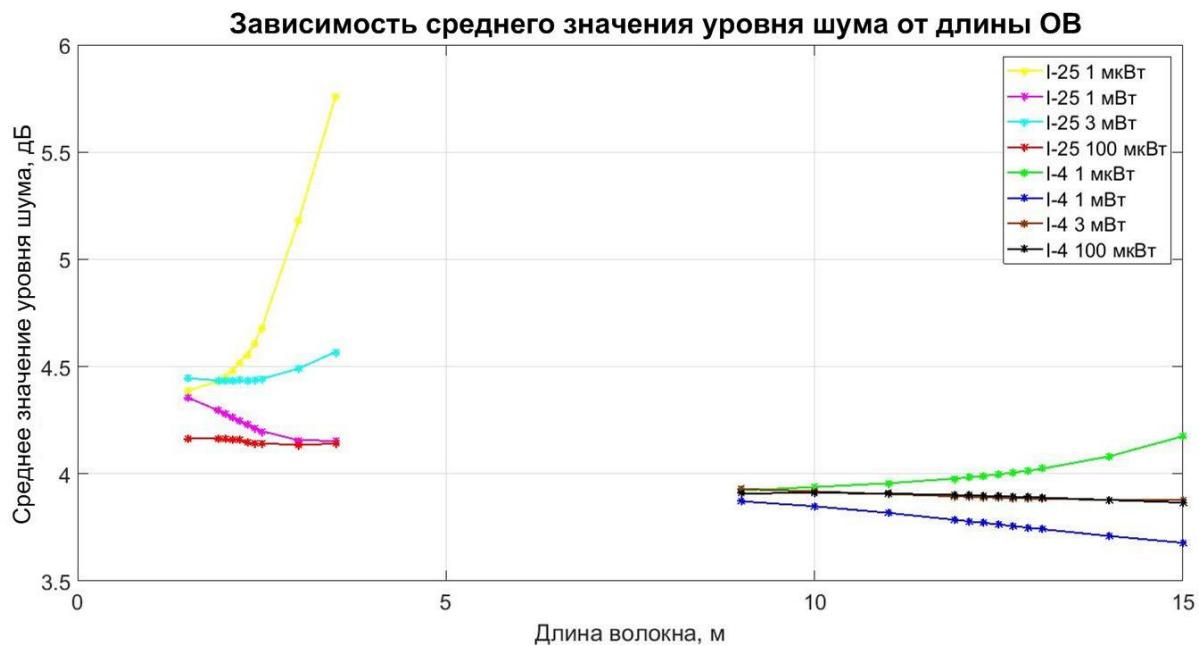


Рис. 5. Зависимости среднего значения уровня шума ВБПТЭОУ от длины ОВ I-4 и I-25

Для значений мощности входного сигнала 1 мкВт, 100 мкВт, 1 мВт и 3 мВт получены зависимости значения Peak-to-Peak (неравномерности) коэффициента усиления в дБ от длины ОВ и зависимости абсолютного значения выходной мощности в Вт от длины ОВ (рис. 6 и 7).

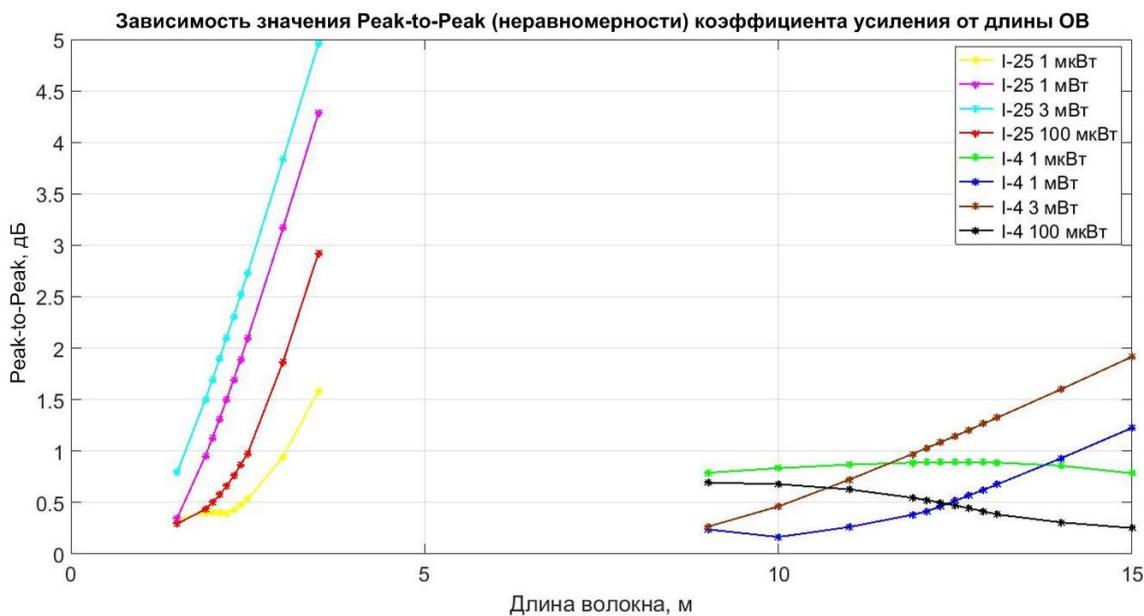


Рис. 6. Зависимости значения Peak-to-Peak (неравномерности) коэффициента усиления от длины ОВ I-4 и I-25

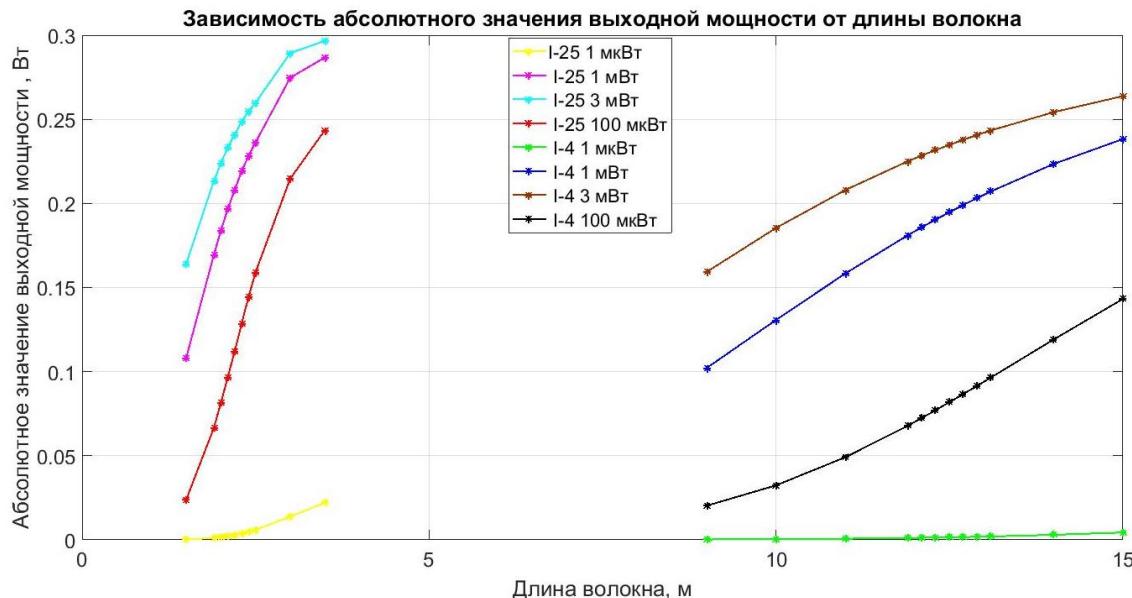


Рис. 7. Зависимости абсолютного значения выходной мощности от длины ОВ I-4 и I-25

В работе рассмотрены практические аспекты в области разработки подводных телекоммуникационных эрбьевых оптических усилителей. Создана структурная схема ВБПТЭОУ и проведено ее моделирование в программе «GainMaster». Получены зависимости среднего значения усиления и среднего значения уровня шумов, значения неравномерности коэффициента усиления и абсолютного значения выходной мощности в выбранной спектральной области от длины оптического волокна при мощности входного сигнала от 1 мкВт до 3 мВт для схемы ВБПТЭОУ с двунаправленной накачкой с использованием эрбьевых волокон I-4 и I-25 фирмы Fibercore. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что при усилении малого сигнала (1 мкВт) коэффициент шума и значения неравномерности коэффициента усиления схемы с ОВ I-4 меньше, чем те же параметры схемы с ОВ I-25. На основе полученных данных будет произведен выбор оптического эрбьевого волокна для формирования макета подводного телекоммуникационного эрбьевого усилителя с двунаправленной накачкой и проведения его экспериментального исследования.

**Литература**

1. Курков А.С., Наний О.Е. Эрбьевые волоконно-оптические усилители // Lightwave russian edition. – 2003. – № 1. – С. 14–19.
2. Mears R.J., Reekie L., Jancie I.M., Payne D.N. Highgain rareearth doped fiber amplifier at 1.54 mm // OSA Technical Digest Series. – 1987. – № 3. – Р. 167.
3. Huang W., Wang X., Cai Z., Xu H., Ye C. A pump power insensitive high stability L-band erbium-doped superfluorescent fibre source // Journal of optics a: pure and applied optics. – 2005. – V. 7. – Р. 179–182.
4. Harasawa S., Sumitani M., Ohta K. Reliability Technology for Submarine Repeaters // FUJITSU Sci. Tech. J. – 2008. – № 4. – Р. 148–155.
5. Алейник А.С., Кикилич Н.Е., Козлов В.Н., Власов А.А., Никитенко А.Н. Методы построения высокостабильных эрбьевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16. – № 4. – С. 593–607.
6. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 10. – С. 881–900.
7. Su H.C., Wang L.A. A highly efficient polarized superfluorescent fiber source for fiber-optic gyroscope applications // IEEE Photonics Technology Letters. – 2003. – V. 15. – № 10. – Р. 1357–1359.
8. Wysocki P.F., Digonnet M.J.F., Kim B.Y. Wavelength stability of a high-output, broadband, Er-doped superfluorescent fiber source pumped near 980 nm // Optics Letters. – 1990. – V. 16. – № 12. – Р. 961–963.

УДК 535-45

## ПОЛЯРИЗУЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СВЕТОДЕЛИТЕЛЬНОГО КУБИКА

Зейгман Р.Е.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Губанова Л.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрена возможность разделения светового потока светоделительным кубиком на *s*- и *p*-поляризацию с помощью интерференционных покрытий, нанесенных на диагональную грань светоделительного кубика. Определена структура светоделительного покрытия и его светотехнические характеристики при условии расходимости падающего пучка при условиях  $\pm 5^\circ$ . Проведена оптимизация полученной структуры покрытия с целью получения максимальной контрастности между *s*- и *p*-поляризацией. Для увеличения пропускной способности светоделительного кубика на его катетных гранях сформировано просветляющее покрытие, на основе диэлектрических пленкообразующих материалов.

**Ключевые слова:** поляризованное излучение, светоделительное покрытие, призма-куб, интерференционное покрытие.

**Введение.** В ряде приборов используются светоделительные кубики, основной целью которых является разделение светового потока по интенсивности на прошедшее и отраженное, при этом поляризация прошедшего и отраженного излучения не нормируется. В приборе, оптическая схема которого представлена на рис. 1 необходимо разделить падающий поток по компонентам поляризации.

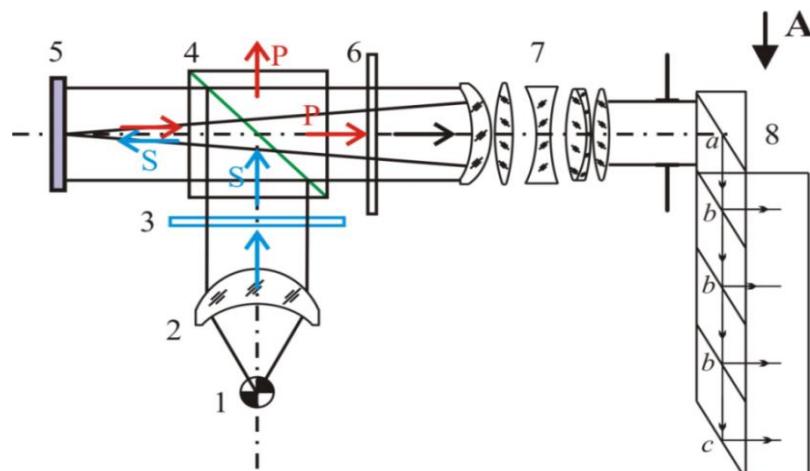


Рис. 1. Схема устройства: 1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – поляризатор; 4 – светоделительная призма; 5 – микропризма FLCOS; 6 – светофильтр; 7 – коллиматорный объектив; 8 – комбинер

Неполяризованное излучение от источника света 1 (светодиода) с помощью конденсора 2 направляется через поляризатор 3 на светоделительную призму-куб 4. Поляризатор 3 выделяет одну из компонент излучения – состояние *s*-поляризации.

Для светоделительной грани призмы-куба необходимо разработать специальное покрытие, которое должно делить падающий поток на две части: отражает *s*-поляризованное излучение и пропускает *p*-поляризованное.

*S*-поляризованное излучение падает на микропризму FLCOS 5, который отражает излучение, попавшее на информационный пиксель, одновременно поворачивая плоскость поляризации, т.е., преобразуя *s*-поляризованное излучение в *p*-поляризованное. Отраженное от экрана *p*-поляризованное излучение проходит к объективу, при этом светоделительная грань призмы практически пропускает это излучение благодаря покрытию.

После осветительного узла может быть установлен дополнительный элемент 6, осуществляющий дополнительную фильтрацию/поворот состояния поляризации.

Поляризованное излучение попадает в коллиматорный объектив 7. После объектива 7 излучение попадает на комбинер 8, который представляет собой систему призматических элементов, на грани которых нанесено селективно отражающее покрытие.

**Материалы.** Для данной конструкции необходимо было разработать некоторые покрытия, повышающие энергосбережение падающего потока. Для успешной работы устройства необходимо, чтобы в расходящемся пучке покрытие отражало максимальное количество *s*-поляризованного излучения, при условии, что расходимость падающего пучка лежит в пределах 5°, и максимальное количество *p*-поляризованного излучения должно проходить через гипотенузную грань. Для нахождения конструкции, обеспечивающей требуемую спектральную характеристику, была использована программа OptiLayer, которая позволяет рассчитать конструкции покрытия для заданного распределения спектрального коэффициента отражения для *s*- и *p*-компонент [1].

**Результаты.** В ходе расчета была получена конструкция интерференционного покрытия, на основе диоксида кремния (показатель преломления 1,45) и диоксида титана (показатель преломления 2,2) [2], изображенная на рис. 2. На этом рисунке также представлены оптические толщины (*nd*) и фазовые толщины ( $\phi$ ) каждого слоя входящего в состав покрытия. Покрытие рассчитано из условия, что излучение на него падает под углом 45°, референтная длина волны, которая выбрана как центральная длина волны рабочего диапазона спектра 510 нм. На рис. 3 представлены спектральные характеристики полученного покрытия, рассчитанные с помощью программы Macleod [3]. Спектральные характеристики представлены для 3-х углов падения 40°, 45°, 50° для *s*- и *p*-компоненты. Значение величины угла падения выбиралась из того, что падающий под углом 45° световой пучок имеет расходимость 5°.

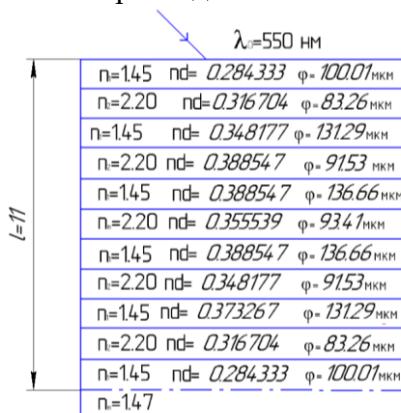


Рис. 2. Структура разработанного покрытия. а – угол падения излучения на покрытие

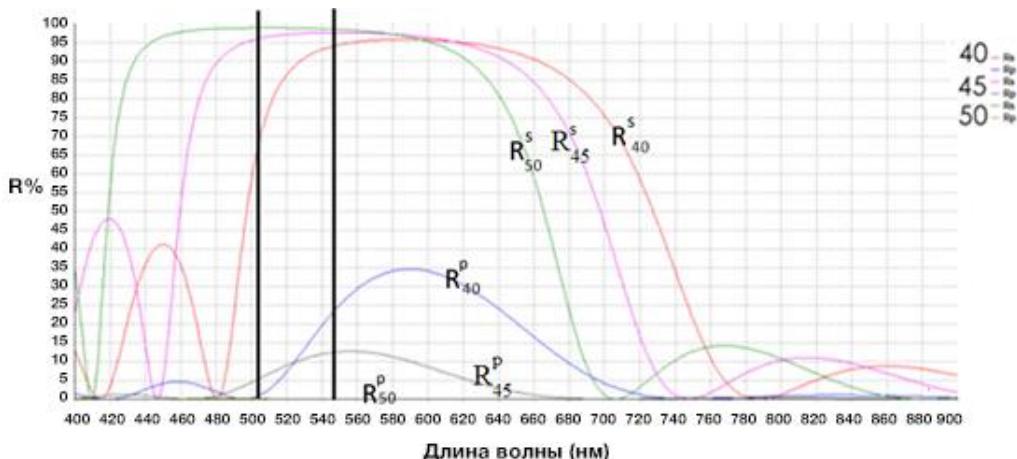


Рис. 3. Спектральная характеристика разработанного покрытия

На рис. 4 представлены спектральные характеристики полученных покрытий в узком спектральном диапазоне.

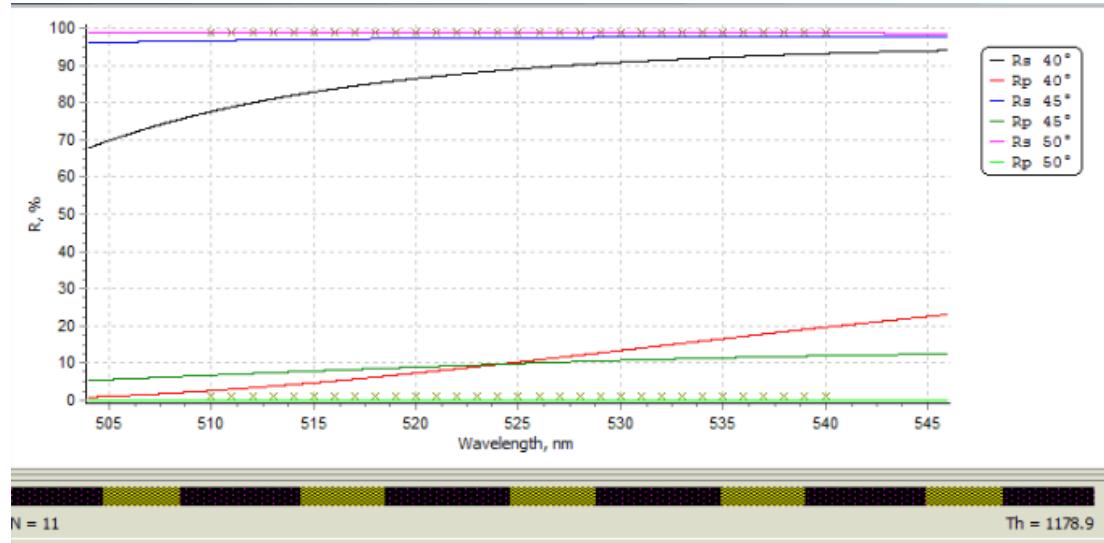


Рис. 4. Спектральная характеристика разработанного покрытия в узком спектральном диапазоне

В рассматриваемом спектральном диапазоне при угле падения от 40–50 градусов, рассчитанное покрытие удовлетворяет условиям поставленной задачи, т.е. обеспечивает максимальное пропускание *p*-компоненты и максимальное отражение *s*-компоненты. Оптимально поставленная задача реализуется при угле падения 50, при угле падения меньше 40 наблюдается незначительное ухудшение деления светового потока на *s*- и *p*-компоненты.

Помимо этого, с целью устранения бликов от рабочих граней кубика для них были выбраны просветляющие покрытия из [4]. Конструкция просветляющих покрытий представлена на рис. 5. Благодаря использованию этих покрытий поток проходящей энергии увеличился на от 74% до 86% при условии, что излучение падает на гипотенузную грань под углом 50°, пропускную способность рассматриваемой системы от 68% до 79% при условии, что излучение падает на гипотенузную грань под углом 45°, пропускную способность рассматриваемой системы от 0,7% до 79% при условии, что излучение падает на гипотенузную грань под углом 45°.

$n_b = 1.94$	$\Pi \cdot d = \frac{\lambda_0}{4}$	$\varphi_2 = 2\pi n_2 d \cos \alpha \lambda^{-1}$
$n_b = 1.45$	$\Pi \cdot d = \frac{\lambda_0}{4}$	$\varphi_2 = 2\pi n_2 d \cos \alpha \lambda^{-1}$
$n_b = 1.94$	$\Pi \cdot d = \frac{\lambda_0}{4}$	$\varphi_1 = 2\pi n_1 d \cos \alpha \lambda^{-1}$
$n_b = 1.47$		

Рис. 5. Конструкция просветляющего покрытия

**Заключение.** В результате проведенных исследований была получена конструкция светоделительного покрытия, способного делить падающее излучение на *s*- и *p*-компоненты. Нанесение просветляющих покрытий на катетные грани светоделительного кубика позволило повысить пропускную способность рассматриваемой системы от 74% до 86% при условии, что излучение падает на гипотенузную грань под углом 50°, пропускную способность рассматриваемой системы от 68% до 79% при условии, что излучение падает на гипотенузную грань под углом 45°, пропускную способность рассматриваемой системы от 0,7% до 79% при условии, что излучение падает на гипотенузную грань под углом 45°.

**Литература**

1. Путилин Э.С., Губанова Л.А. Оптические покрытия. Учебник. – СПб.: Лань. 2016. – 269 с.
2. SCHOTT. OpticalFilters. Catalog.Germany. – 2015. – 149 p.
3. Angus H. Macleod. Thin-Film Optical Filters. – Fourth Edition. – USA: CRC Press, 2010. – 800 p.
4. ГОСТ 3-1901-95. Нормативно-техническая информация общего назначения, включаемая в формы технологических документов. – Введен 01.01.1975. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 7 с.

УДК 60:579.6

## СКРИНИНГ КОЛЛЕКЦИИ ГЕТЕРОТРОФНЫХ БАКТЕРИЙ НА ПРОДУКЦИЮ ГОРМОНОВ РОСТА РАСТЕНИЙ И РОСТОСТИМУЛЯЦИЮ

Каменская М.А.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.биол.н., доцент Пастухова Н.Д.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В данной работе с целью разработки микробных удобрений для повышения активности растениеводства, были исследованы штаммы гетеротрофных бактерий. Проведено сравнение на содержание фитогормона-ауксина и установлено ростостимулирующие влияние перспективных штаммов на проростки салата.

**Ключевые слова:** фитогормоны, ауксины, ростостимуляция, скрининг, гетеротрофные бактерии, ИУК.

В настоящее время одной из ключевых проблем в отрасли сельского хозяйства является разработка высококачественных и экологически чистых ростостимулирующих препаратов, которые способны повышать эффективность и урожайность растениеводства. По этой причине с каждым годом разрабатывается все большее количество разнообразных удобрений и средств защиты растений. Использование минеральных удобрений может повысить показатели урожайности до 5 раз. Однако использование удобрений, в состав которых входит минеральный комплекс химических веществ, негативным образом влияет на состояние здоровья человека, а также на биоразнообразие различных почвенных микроорганизмов, при этом ухудшается состояние почвенных покровов, изменяется кислотность почв и вымываются полезные катионы [1].

В связи с этим возрос особый интерес к применению бактериальных удобрений, сохраняющих экологическую безопасность продукции и способствующих снижению хемогенной нагрузки на агроландшафт [2]. Среди наиболее перспективных бактериальных удобрений выделяют биопрепараты на основе эндофитных и эпифитных гетеротрофных микроорганизмов. Эндофитные бактерии представляют собой микроорганизмы, которые населяют ткани растений, не вызывая негативного влияния на их развитие и функционирование. В свою очередь, эпифитные бактерии произрастают на поверхности растений (в филлосфере и ризосфере) и осуществляют основные процессы жизнедеятельности за счет выделений тканей растительных культур. Положительное действие бактерий объясняется их способностью к продукции фитогормонов, стимулирующих рост растений. В нашей работе особое внимание уделялось одному из фитогормонов – ауксину, содержащему в своем составе индолил-3-уксусную кислоту (ИУК). Нами был проведен скрининг коллекции гетеротрофных эпифитных и почвенных бактерий на способность к синтезу ауксина. Было исследовано 12 штаммов бактерий родов *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas* и *Arthrobacter*. Бактерии культивировали на жидких и твердых питательных средах при рН=7: ГПД (глюкозо-пептонной с дрожжевым экстрактом) и Эшби.

В опытных вариантах для определения количества индолил-3-уксусной кислоты использовали D,L – триптофан в качестве прекурсора ИУК в концентрации 0,05. Во флакон вносили 10 мл раствора триптофана и 40 мл жидкой среды-для последующего культивирования микроорганизмов [3]. Полученную суспензию разливали по 1 мл в пробирки типа Эппендорф, куда вносили 1 петлю исследуемого штамма, взятого с твердой среды. Культивирование осуществляли в течение трое суток в стационарном режиме при температуре 28°C. Для определения содержания ИУК в культуральной жидкости, пользовались колориметрическим методом с применением реактива Сальковского. Для этого отобрали и перенесли в стерильную пробирку 0,5 мл

надосадочного бактериального материала и 0,5 мл реактива Сальковского. Выросшие культуры центрифугировали в течение 10 мин при 13000 об/мин. Через 30 мин у некоторых штаммов проявилось розовое окрашивание, что говорит о содержании ИУК. Результаты изучения способности исследуемых штаммов гетеротрофных бактерий к синтезу индолил-3-уксусной кислоты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели продукции ИУК в чистых культурах гетеротрофных бактерий

№, п/п	Штамм	Грам-реакция	Содержание ИУК
1	W6	Грам-(+)	—
2	105700Т	Грам-(+)	—
3	B4	Грам-(+)	—
4	SNK1	Грам(-)	+/-
5	SNK2-1	Грам-(+)	—
6	SNK2	Грам-(+)	—
7	NO9-2e	Грам(-)	—
8	SO9-3e	Грам(-)	—
9	NK9	Грам(-)	+
10	NK VI	Грам-(+)	—
11	SNK6	Грам-(+)	+/-
12	Г3	Грам(-)	—

Обозначения: «+» – положительная реакция; «+/-» – слабоположительная реакция; «-» – отрицательная реакция.

Можно отметить, что способность к образованию ауксинов проявлялась в различной степени. Наибольшая концентрация ауксинов была выражена у штаммов SNK1, NK9 и SNK6.

Ростостимуляцию растений проверяли при проращивании обработанных семян сорта «Персей» (производство ООО «Группа компаний «Гавриш»). Использовали бактериальные супензии в концентрации  $10^6$  –  $10^8$  КОЕ/мл.

Культуры высевали и инкубировали в течение трех суток. Из полученной супензии на трети сутки начали производить разведение от 1:10 до 1:1000000. Затем заливали в чашки Петри по 15–20 мл среды ГПД, расплавленной и остуженной до +45–50°C, и смешивали питательную среду с посевным материалом. Через 3 дня считали среднее число колоний в чашках Петри. Проводили измерения по двум повторностям для каждой культуры. Титр вычисляли по формуле:

$$T = \frac{ax10^n}{V}, \quad (1)$$

где  $T$  – количество колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1,0 мл;  $a$  – среднее число колоний, выросших после посева из данного разведения;  $V$  – объем супензии, взятый для посева;  $10^n$  – коэффициент разведения [4].

По истечении срока каждый образец подвергался супензированию при помощи персонального вортекса V-1 plus Biosan (Биосан, Латвия). Эксперимент проводили в трех повторностях на каждую культуру. С целью определения ростостимулирующего влияния исследуемых штаммов на проростки семян салата, чашки Петри оставляли в темном помещении при комнатной температуре. Подсчет и измерение ростков проводили на пятые сутки эксперимента. О действии микропрепараторов из образцов исследуемых культур судили по всхожести семян. Текущими характеристиками выступали корень и побег ростков.

Ни один образец не оказал ингибирующего воздействия на развитие растений и не привел к дальнейшему увяданию или замедлению роста [4]. Результаты влияния микроорганизмов на проростки салата приведены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние микробных препаратов гетеротрофных микроорганизмов на развитие семян салата

Образец	Длина побега		Длина корня	
	мм	в % к контролю	мм	в % к контролю
Контроль	26,3	0	13,03	0
W6	26,34	0,15	14,09	7,52
105700Т	27,11	2,99	13,5	3,48
B4	26,49	0,72	15,84	17,74
SNK1	33,51	21,52	20,33	35,91
SNK2-1	27,98	6,00	14,66	11,12
SNK2	28,02	6,14	17,96	27,45
NO9-2е	26,87	2,12	13,14	0,84
SO9-3е	26,64	1,28	16,75	22,21
NK9	40,1	34,41	28,25	53,88
NK VI	27,05	2,77	15,32	14,95
SNK6	33,6	21,73	25,73	49,36
Г3	28,84	8,81	17,26	24,51

Вместе с тем было отмечено, что некоторые штаммы обладают повышенным стимулирующим действием. Значительное увеличение длины побега и корня проростков наблюдалось у таких штаммов, как NK9, SNK1 и SNK6. Такое влияние гетеротрофных культур связано с тем, что у них была обнаружена способность к продуцированию ауксина, который улучшает всхожесть семян и повышает урожайность при действии на растение. Результат по сравнению с контролем представлен на рисунке.

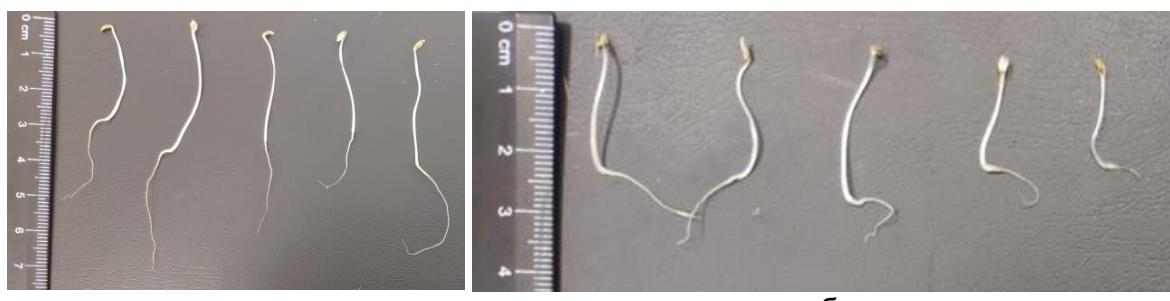


Рисунок. Ростостимулирующее влияние перспективных штаммов на проростки салата: контроль (а); вариант на примере штамма NK9 (б)

Таким образом, способность к образованию ауксинов проявляется у гетеротрофных бактерий в различной степени. Наибольшая активность наблюдалась у представителей родов *Bacillus* и *Pseudomonas*, что и повлияло на ростостимулирующее действие данных культур по отношению к растению.

### Литература

- Чеботарь В.К., Завалин А.А., Кипрушкина Е.И. Эффективность применения биопрепарата Экстрасол. – М., 2007.
- Хузина Э.Р., Габдрахманов И.Х. Оптимизация применения бактериальных удобрений на яровой пшенице // Агрохимический вестник. – 2009. – № 5. – С. 16–17.

3. Шеховцова Н.В. и др. Образование ауксинов эндофитными бактериями подземных органов *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo (Orchidaceae) // Вестн. ОГУ. – 2011. – № 12. – С. 361–363.
4. Маслиенко Л.В., Курилова Д.А., Асатурова А.М., Шипиевская Е.Ю. Влияние лабораторных образцов биопрепаратов на основе перспективных штаммов антагонистов фитопатогенов на проростки сои // Масличные культуры: Науч.-техн. бюл. ВНИИ маслич. культур. – 2010. – Вып. № 1(142-143). – С. 104–108.

УДК 681.787

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗЫ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА МЕТОДОМ АДАПТИВНОЙ  
ФИЛЬТРАЦИИ ВИНЕРА**

Капранова В.О.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.т.н., профессор Гуров И.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрена фильтрация Винера (ФВ) для определения фазы волнового фронта при обработке набора интерференционных картин с заданными фазовыми сдвигами. Получены зависимости элементов корреляционной матрицы и вектора взаимной корреляции опорного и входного сигналов в зависимости от начальной фазы сигнала, необходимые для расчета весовых коэффициентов. Изучены погрешности метода.

**Ключевые слова:** адаптивная фильтрация Винера, интерференционная картина, фазовый сдвиг, корреляционная матрица, вектор взаимной корреляции.

**Введение.** Методы интерферометрии широко используются для решения задач высокоточного контроля геометрических характеристик различных объектов, в том числе отклонений формы поверхности прецизионных элементов оптических систем [1]. При этом осуществляют восстановление формы волнового фронта измерительной волны в интерферометре при ее отражении от исследуемого объекта. Отклонения фаз в поле наблюдения по отношению к опорной волне характеризуют исследуемый объект с погрешностью до сотых долей от длины волны оптического излучения.

При формировании интерференционной картины на точность измерений оказывают влияние неравномерность освещения и контраста интерференционных полос в поле наблюдения. Для устранения влияния мешающих факторов широко используются методы интерферометрии управляемого фазового сдвига (ИУФЗ), в которых регистрируют набор интерференционных картин с заданным взаимным фазовым сдвигом и в результате их совместной обработки определяют значение фазы интерференционных полос с высокой точностью (см., например, [1–3]).

Методы ИУФЗ можно разделить на две группы: итерационные [4, 5] и динамические (см., например, [6]). Методы первой группы обеспечивают высокую точность, однако не позволяют восстанавливать форму волнового фронта в динамическом режиме записи видеокадров. Необходимо учитывать, что исследуемые объекты в процессе измерений испытывают влияние теплового воздействия (градиентов температуры) и других внешних факторов, поэтому актуальная задача состоит в создании методов динамического восстановления формы волнового фронта. При этом целесообразно использовать помехоустойчивые методы обработки набора интерференционных картин. Один из эффективных подходов заключается в использовании принципа оптимальной фильтрации интерферометрических сигналов по критерию минимума среднего квадратичного отклонения (СКО) от заданной модели сигнала, в частности, на основе оптимальной фильтрации Винера (ФВ) [7]. Однако до настоящего времени ФВ не использовался в ИУФЗ ввиду распространенности других алгоритмов обработки [1–5]. Вместе с тем, возможности оптимальной динамической адаптивной обработки набора интерференционных картин в известных методах реализованы не в полной мере, что ограничивает потенциальные возможности ИУФЗ при контроле динамических объектов.

В данной работе представлены результаты исследования адаптивного ФВ для динамического восстановления волнового фронта с высокой точностью и помехоустойчивостью.

**Метод фильтрации Винера в интерферометрии управляемого фазового сдвига.** В ИУФЗ формируют набор интерференционных картин, регистрируемых при помощи видеокамеры, который можно представить в форме векторного сигнала

$$s(i, j, k) = a(i, j) \cos[\gamma k + \varphi(i, j)] + b(i, j), \quad (1)$$

где  $(i, j)$  – дискретные координаты пикселя видеокамеры;  $k$  – номер видеокадра,  $k = 0, \dots, K$ ;  $a(i, j)$  и  $b(i, j)$  – локальная амплитуда и фоновая составляющая интенсивности интерференционных полос, соответственно;  $\varphi(i, j)$  – искомые значения фазы интерференционных полос;  $\gamma$  – величина задаваемого фазового сдвига.

Представим скалярный компонент интерферометрического сигнала (1) в пикселе  $(i, j)$  в зависимости от номера видеокадра  $k$  в форме

$$s(k) = a \cos(\gamma k + \varphi) + b \quad (2)$$

и рассмотрим схему ФВ для определения параметров сигнала (2), представленную на рис. 1.

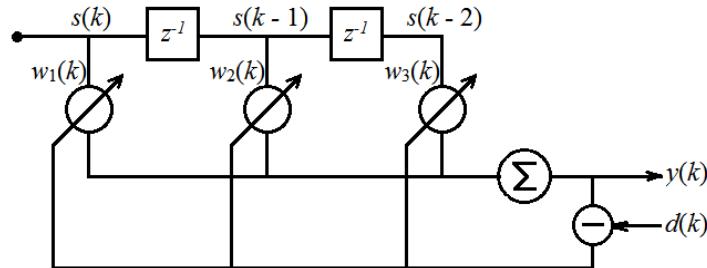


Рис. 1. Структурная схема адаптивного фильтра Винера. Обозначение  $z^{-1}$  соответствует сдвигу фазы на один шаг

Отсчеты входного сигнала, соответствующие значениям зарегистрированной интенсивности света в интерференционной картине в последовательности видеокадров, суммируются с весовыми коэффициентами  $w_1, w_2, w_3$ . Поскольку сигнал (2) содержит три неизвестных параметра  $a, \varphi, b$ , для определения этих параметров необходимо зарегистрировать не менее трех отсчетов сигнала. Результирующий сигнал определяется выражением

$$y(k) = \sum_{m=0}^2 w_{m+1} s(k-m). \quad (3)$$

Сигнал (3) сравнивается с заданным опорным сигналом, определяемым как

$$d(k) = A \cos(\gamma k) + B, \quad (4)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные величины. В адаптивном ФВ коэффициенты  $w_1, w_2, w_3$  динамически подстраиваются по критерию минимума дисперсии ошибки  $\varepsilon(k) = y(k) - d(k)$ , а именно

$$\langle \varepsilon^2(k) \rangle \rightarrow \min. \quad (5)$$

Показано (см., например, [8]), что критерий (5) выполняется при значениях весовых коэффициентов, определяемых соотношением

$$\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{g}, \quad (6)$$

где  $\hat{\mathbf{w}} = [\hat{w}_1 \hat{w}_2 \hat{w}_3]^T$ ;  $\mathbf{R} = \langle \mathbf{s}(k) \mathbf{s}^T(k) \rangle$  – корреляционная матрица отсчетов входного сигнала, имеющая обратную матрицу  $\mathbf{R}^{-1}$ ;  $\mathbf{s}(k) = [s(k) \ s(k-1) \ s(k-2)]^T$ ;  $\mathbf{g} = \langle d(k) \mathbf{s}(k) \rangle$  – вектор взаимной корреляции опорного и входного сигналов, угловые скобки обозначают усреднение по ансамблю реализаций сигнала.

Поскольку вектор оптимальных весовых коэффициентов фильтра  $\hat{\mathbf{w}}$  определяется согласно (6) обратной корреляционной матрицей входного сигнала и

вектором взаимной корреляции опорного и входного сигналов, необходимо исследовать зависимости этих величин от искомых значений фазы  $\varphi$  сигнала (2).

**Моделирование корреляционных характеристик сигналов.** При моделировании сигнала (2) значения амплитуды и фоновой составляющей принятые равными  $a=1$ ,  $b=1,5$ .

На рис. 2 приведены кривые, соответствующие значениям элементов корреляционной матрицы  $\mathbf{R}$  в зависимости от начальной фазы сигнала (2) при заданной величине фазового сдвига  $\gamma=2\pi/7$ .

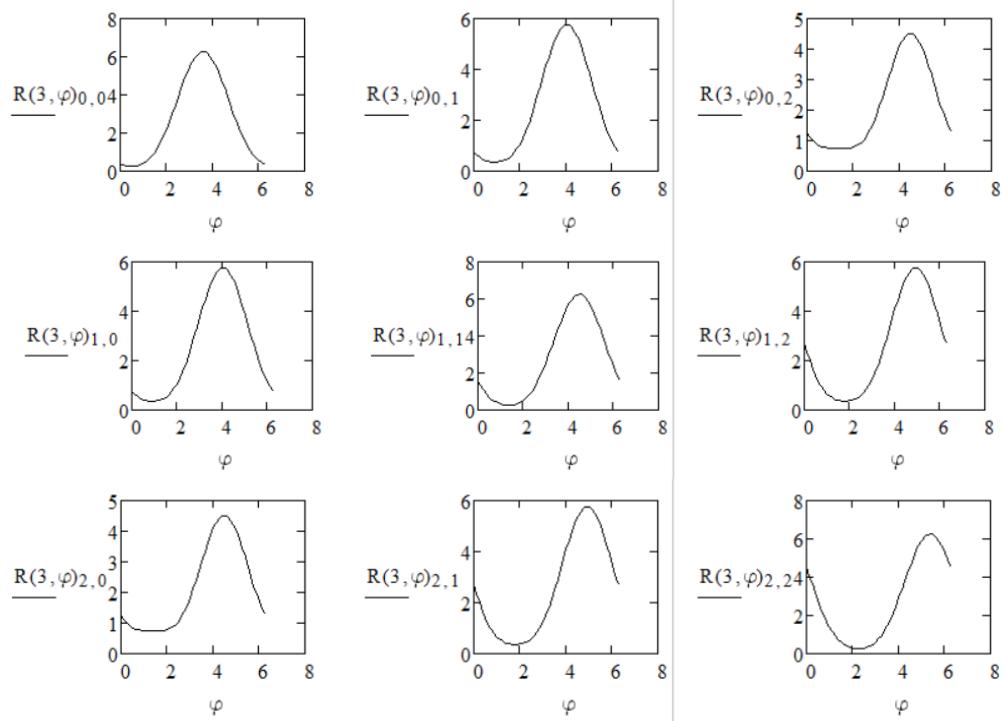


Рис. 2. Зависимости элементов корреляционной матрицы от значений начальной фазы интерферометрического сигнала. Индексы обозначения на вертикальной оси соответствуют положению элементов матрицы

Из рисунка видно, что матрица симметрическая, и значения ее элементов изменяются в соответствии с начальной фазой сигнала.

На рис. 3 показаны зависимости элементов вектора взаимной корреляции опорного и входного сигналов от начальной фазы входного сигнала. Важно отметить, что вектор взаимной корреляции включает в себя априорную информацию об идеализированном сигнале, задаваемом моделью (4). Для упрощения анализа амплитуда и фоновая составляющая сигнала (4) принятые равными  $A=1$ ,  $B=1,5$ .

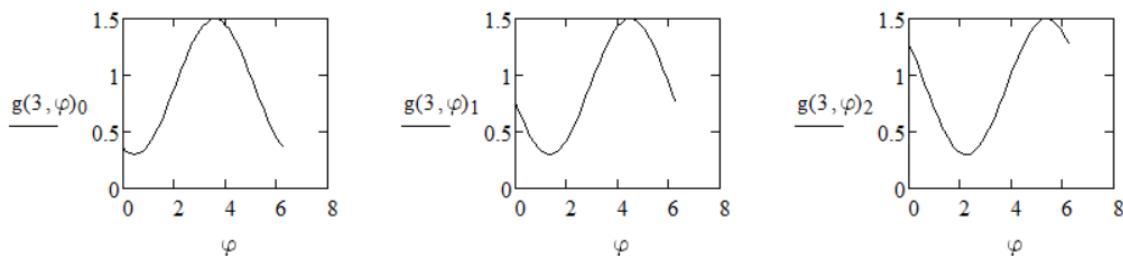


Рис. 3. Изменения элементов вектора взаимной корреляции в зависимости от начальной фазы входного сигнала

На рис. 4 приведены кривые для элементов обратной матрицы  $\mathbf{R}^{-1}$  в (6), а на рис. 5 – вычисленные согласно (6) значения весовых коэффициентов ФВ  $\hat{\mathbf{w}} = [\hat{w}_1 \hat{w}_2 \hat{w}_3]^T$ .

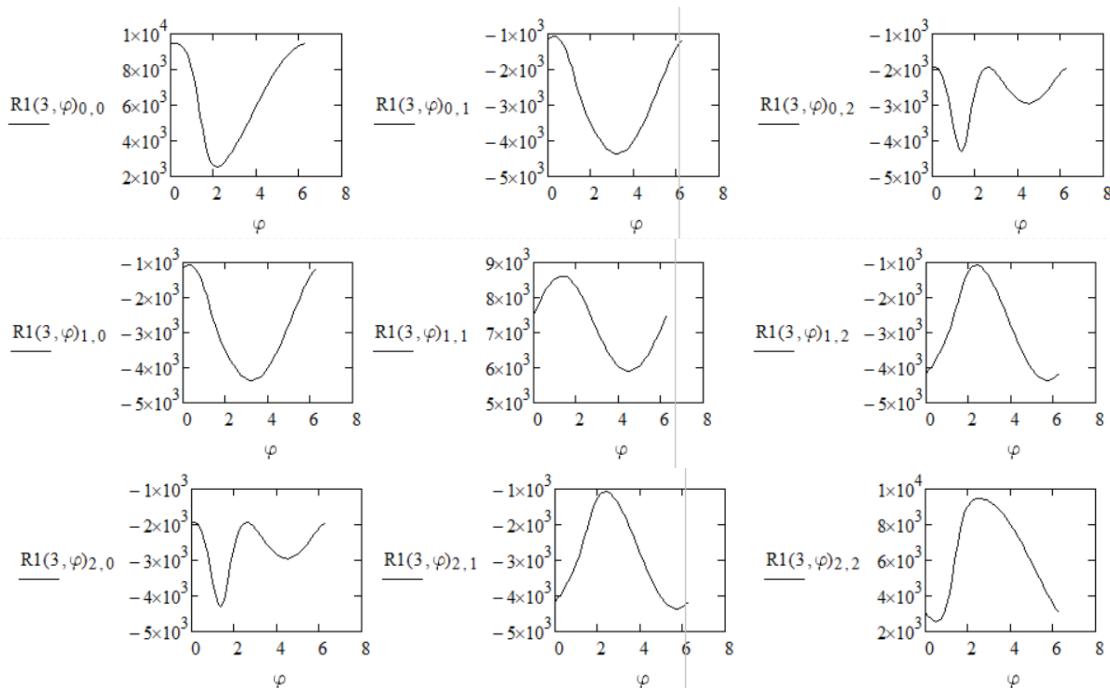


Рис. 4. Элементы обратной корреляционной матрицы

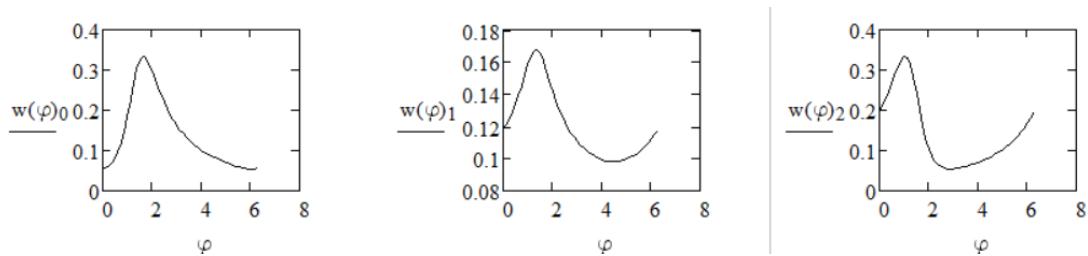


Рис. 5. Рассчитанные весовые коэффициенты адаптивного ФВ

Можно показать (см., например, [8]), что дисперсия ошибки фильтрации в (5) выражается как

$$\varepsilon_{\min}^2 = d^2(k) - \mathbf{g}^T \hat{\mathbf{w}}. \quad (7)$$

Из (7) видно, что ФВ обеспечивает получение оптимальных весовых коэффициентов  $\hat{\mathbf{w}} = [\hat{w}_1 \hat{w}_2 \hat{w}_3]^T$  таких, что квадрат опорного сигнала выражается через взвешенный набор элементов вектора взаимной корреляции опорного и входного сигналов.

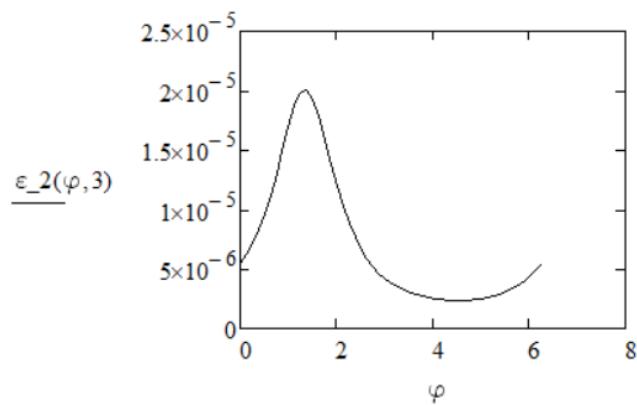


Рис. 6. Оценка дисперсии ошибки ФВ

На рис. 6 приведена зависимость дисперсии ошибки (7) от значений начальной фазы входного сигнала.

Из рис. 6 видно, что дисперсия ошибки весьма мала и СКО не превышает 0,5%.

**Заключение.** Проведенные модельные исследования позволили уточнить характер изменения элементов корреляционной матрицы отсчетов сигнала и вектора взаимной корреляции опорного и входного сигналов в зависимости от начальной фазы сигнала, которые необходимы для определения оптимальных значений весовых коэффициентов ФВ.

Получены зависимости весовых коэффициентов ФВ от начальной фазы сигнала и показано, что трех отсчетов входного сигнала достаточно для точного определения начальной фазы интерферометрического сигнала.

### Литература

1. Malacara D., Servín M., Malacara Z. Interferogram Analysis for Optical Testing. – 2nd ed. – Boca Raton, CRC Press, 2005. – 546 p.
2. Schmit J., Creath K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry // Appl. Opt. – 1995. – V. 34. – P. 3610–3619.
3. Novák J., Novák P., Mikš A. Multi-step phase-shifting algorithms insensitive to linear phase shift errors // Opt. Commun. – 2008. – V. 281. – P. 5302–5309.
4. Wang Z., Han B. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms // Opt. Lett. – 2004. – V. 29. – P. 1671–1673.
5. Patil A., Rastogi P. Approaches in generalized phase shifting interferometry // Opt. Lasers Eng. – 2005. – V. 43. – P. 475–490.
6. Gurov I., Volynsky M. Interference fringe analysis based on recurrence computational algoritms // Opt. Lasers Eng. – 2012. – V. 50. – P. 514–521.
7. Vaseghi S.V. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction. – 2nd edition. – John Wiley and Sons, Ltd, 2000. – 473 p.
8. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.

УДК 544 032 65

**ВЛИЯНИЕ СЛОЕВ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ СТРУКТУРУ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ****Киян А.И.<sup>1</sup>****Научный руководитель – к.т.н. Синев Д.А.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе исследовано воздействие лазерного излучения на поверхность титана при режимах сухой и ассистированной обработки. Изучены зависимости параметров образованных микроструктур в зависимости от параметров лазерного воздействия. Определены пороговые значения лазерного воздействия для абляции титана и рабочие режимы для наиболее эффективной обработки.

**Ключевые слова:** лазерное микроструктурирование, лазерная обработка титана.

**Введение.** С помощью лазерного микроструктурирования, за счет возможности к фокусировке лазерного излучения в малый пучок, можно добиться структур порядка микрометров и менее. Также из-за высокой интенсивности и малой длительности воздействия, нагрузка на материал снижается, что ведет к возможности осуществления обработки более тонких образцов.

Однако в наносекундных режимах лазерной обработки, расщепление и осаждение материала, вытесненного из образовавшихся кратеров, может отрицательно сказаться на достигнутом механическом качестве в таких маленьких масштабах. Анализ, проведенный в работе [1] для обработки титана излучением волоконного лазера с длиной волны 1064 нм с длительностями импульса от 25 нс до 220 нс и плотностями мощности от 14 Дж/см<sup>2</sup> до 56 Дж/см<sup>2</sup> показал, что наиболее низкая шероховатость одиночных кратеров была достигнута в диапазоне 85–140 нс. Авторы исследования связывают причины снижения шероховатости с нагревом в оклопороговом режиме, когда максимальная температура кратера абляции незначительно превышала температуру испарения титана.

Обработка лазерным лучом под водой рассматривается как один из альтернативных подходов, чтобы минимизировать нежелательные последствия лазерной обработки сухого образца, такие как грубую обработку и шероховатость поверхности, высокую степень повторного осаждения аблированного материала и термомеханические повреждения массивного образца. Вода в динамическом и статическом режиме обычно используется для уменьшения повторного осаждения расплава и улучшения механической обработки и шероховатости поверхности [2].

Также проводились исследования лазерного ударного воздействия титана при контакте со вспомогательным слоем металла [3]. Лазерная ударная обработка не только создает микроструктуры, но и увеличивает прочность за счет остаточного напряжения с высокой амплитудой сжатия на поверхности металла, что может эффективно сдерживать образование трещин усталости.

В настоящей работе исследуется воздействие излучения коммерчески доступной лазерной системы Минимаркер-2 на поверхность титана в режимах простой (сухой шлифованный и полированный титан) и ассистированной обработки (полированный титан под слоем жидкости и пр.). Изучены зависимости параметров образованных микроструктур (глубина, диаметр и шероховатость кратеров) в зависимости от параметров лазерного воздействия (плотности мощности, длительности импульсов, режим обработки). Определены пороговые значения лазерного воздействия для абляции титана и рабочие режимы для наиболее эффективной обработки.

**Экспериментальные результаты.** При варьировании длительности импульса от 14 нс до 200 нс и средней мощности от 0,5 Вт до 20 Вт, были получены диаграммы зависимости радиусов полученных кратеров (рис. 1).

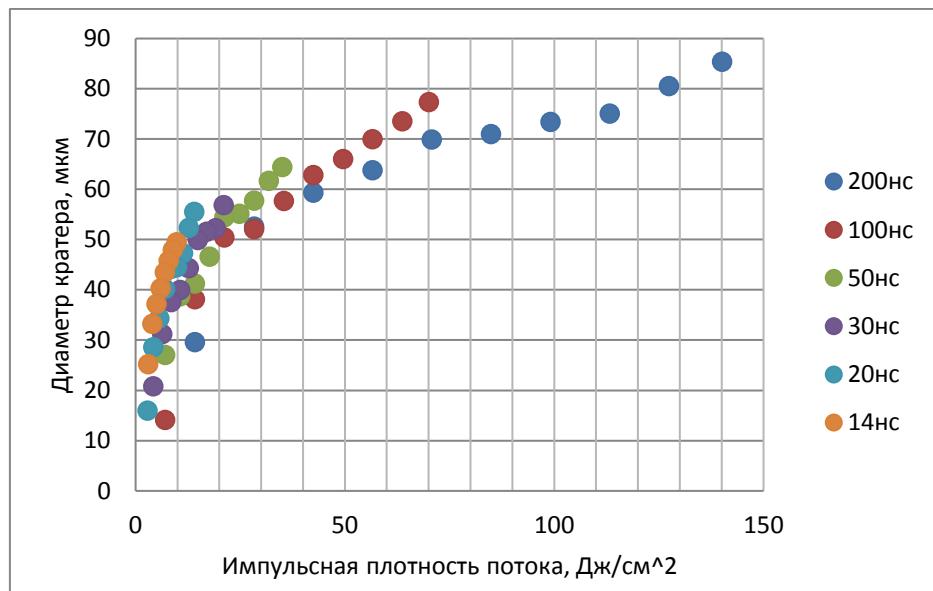


Рис. 1. Зависимость радиуса кратера от длительности импульса и импульсной плотности потока

Из графика видно, что пороги абляции снижаются с уменьшением длительности импульса при одинаковой средней мощности, что объясняется тем, что импульсная мощность обратно пропорционально зависит от длительности импульса (рис. 2).

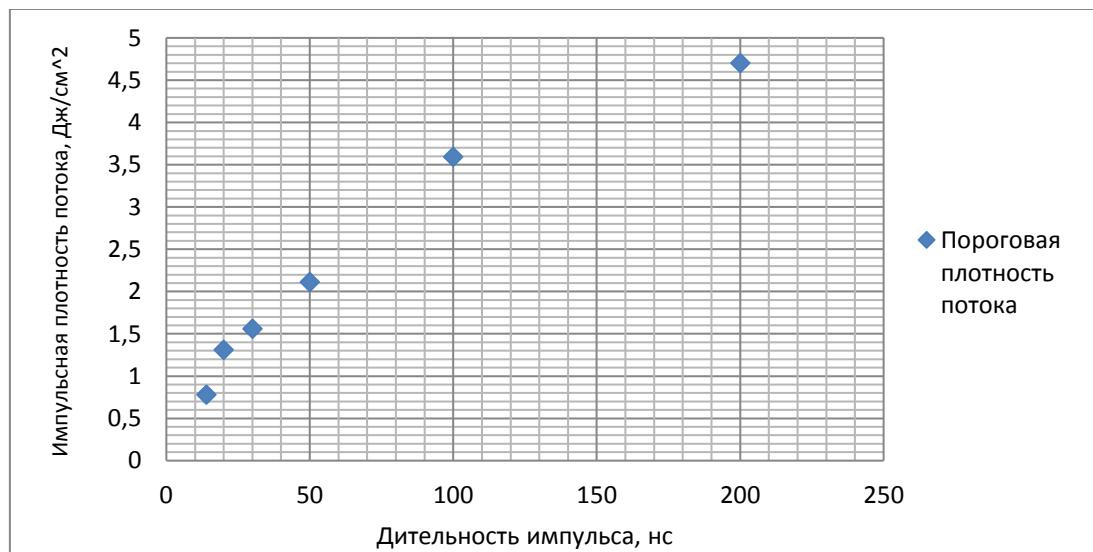


Рис. 2. Зависимость пороговой плотности потока от длительности импульса

Диаметры абляционных кратеров управляются варьируются в диапазоне от 10 до 90 мкм при диаметре лазерного пятна в фокальной плоскости около 55 мкм. Аналогичные зависимости, полученные для абляции под тонким слоем вспомогательной жидкости, показывают значительное повышение эффективности выноса материала, что может быть связано с формированием кавитационных пузырей и ударных волн [4].

Для того, чтобы выбрать материал и выбрать толщину слоя металла для микроструктурирования титана путем аблации пленки, был проведен подбор и оценка необходимой толщины вспомогательного слоя.

Для решения данной задачи воспользовались следующими формулами [5]:

$$T_1 = \frac{q_0 A_1 \tau}{\rho_1 c_1 h \left( 1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2\psi} \right)} + T_{\text{h}}, \quad (1)$$

$$q_0 = \frac{q_{\text{cp}}}{\tau f} = \frac{P_{\text{cp}}}{S \tau f} = \frac{P_{\text{cp}}}{\pi r^2 \tau f}, \quad (2)$$

$$\psi = \frac{\rho_1 c_1 h}{\rho_2 c_2 \sqrt{a_2 \tau}}, \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{k_2}{\rho_2 c_2}, \quad (4)$$

где  $q_0$  – импульсная плотность мощности падающего излучения;  $q_{\text{cp}}$  – средняя плотность мощности падающего излучения;  $A$  – поглощательная способность,  $\rho$  – плотность;  $c$  – теплоемкость;  $a$  – температуропроводность;  $k$  – теплопроводность;  $T_{\text{h}}$  – начальная температура;  $\tau$  – длительность импульса;  $\psi$  – комплекс определяющий интенсивность теплоотвода из пленки в подложку;  $f$  – частота падающего излучения;  $P_{\text{cp}}$  – средняя мощность;  $r$  – радиус пучка в фокусе.

И из них получили формулу для расчета толщины пленки:

$$h = \frac{\frac{P_{\text{cp}} A_1}{\pi r^2 f \Delta T} - \frac{\sqrt{\pi k_2 \rho_2 c_2 \tau}}{2}}{\rho_1 c_1}. \quad (5)$$

Были предложены материалы – цинк, сурьма и висмут, так как их температуры кипения значительно ниже температуры плавления титана.

Расчет произвели с параметрами приведенными в табл. 1, рассчитанные значения толщин пленок приведены в табл. 2.

Таблица 1. Параметры лазерного воздействия и материалов [6, 7]

Параметры излучения	$P_{\text{cp}} = 20$ Вт	$r = 25$ мкм	$f = 20$ кГц	$\tau = 200$ нс
Параметры материалов				
$A$	–	0,1156	0,45	0,36
$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	4500	6920	6691	9790
$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	522,69	388,5	206,96	124,41
$\Delta T_{\text{кип}}, ^\circ$	–	887	1615	1544
$\Delta T_{\text{плав}}, ^\circ$	1648	–	–	–
$k, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	15,5	–	–	–

Таблица 2. Рассчитанные значения вспомогательных пленок

	Цинк	Сурьма	Висмут
$\Delta T_{\text{кип}}$	23,8 мкм	104,0 мкм	95,5 мкм
$\Delta T_{\text{плав}}$	12,4 мкм	98,7 мкм	89,4 мкм

В качестве материала для вспомогательного слоя был предложен цинк, так как у него самый большой диапазон допустимых толщин пленки  $h_1-h_2=11$  мкм, что

обеспечит точность нанесения пленки термовакуумным испарением при погрешности  $\pm 5$  мкм, в отличие от висмута и сурьмы, для которых допустимых диапазон составляет порядка 6 мкм.

**Вывод.** В данной работе была проведена оценка влияния длительности импульса на размеры получаемых кратеров на поверхности титана в режимах простой и ассистированной обработки. Было показано, что в простом режиме при уменьшении длительности импульса при одинаковой средней мощности радиус кратера больше. Также был получен график зависимости энергии порога абляции от длительности импульса. Энергия порога абляции уменьшается с уменьшением длительности импульса, что объясняется тем, что импульсная мощность обратно пропорционально зависит от длительности импульса.

### Литература

1. Williams E., Brousseau E.B. Simulation and Experimental Study of Nanosecond Laser Micromachining of Commercially Pure Titanium // Journal of Micro- and Nano-Manufacturing. – 2016. – V. 4(1). – 9 p.
2. Alahmari A.M., Ahmed N. Laser beam micro-machining under water immersion // The International Journal of advanced manufacturing technology. – 2016. – V. 83. – P. 9–12.
3. Dai F., Zhang Z. Effects of laser shock peening with contacting foil on micro laser texturing surface of Ti6Al4V // Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – V. 101. – P. 99–105.
4. Вейко В.П., Самохвалов А.А. Анализ механизма лазерной абляции под слоем жидкости на основе термофлуктуационной теории разрушения // Изв. вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – № 6. – С. 54–58.
5. Вейко В.П., Шахно Е.А. Сборник задач по лазерным технологиям. – Изд. 3-е, испр. и дополн. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 67 с.
6. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
7. Werner W.S.M., Glantschnig K., Ambrosch-Draxl C. Optical constants and inelastic electron-scattering data for 17 elemental metals // J. Phys Chem Ref. Data. – 2009. – V. 38. – P. 1013–1092.

УДК 621.373.826

## 946 нм Nd:YAG ЛАЗЕР 2,5 мДж/1,6 нс С РАЗГРУЗКОЙ РЕЗОНАТОРА

Корнев А.Ф.<sup>1</sup>, Ковяров А.С.<sup>1</sup>, Покровский В.П.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.ф.-м.н., профессор Викторов Е.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

Работа посвящена импульсной генерации в Nd:YAG лазере с продольной накачкой работающем на длине волны 946 нм. Отличительной особенностью разработанного лазера является комбинация короткой длительности импульса 1,6 нс с высокой выходной энергией до 2,5 мДж. Частота следования импульсов составляет 50 Гц. Достижение вышеперечисленных параметров стало возможным благодаря применению метода разгрузки резонатора.

**Ключевые слова:** лазер, разгрузка резонатора.

**Введение.** В настоящее время большое внимание уделяется лазерам с длиной волны 946 нм, которая соответствует квази-трехуровневому переходу  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  в кристаллах Nd:YAG. Излучение с длиной волны 946 нм с хорошей точностью попадает в спектр поглощения молекул водяного пара, что позволяет использовать его для измерения концентрации водяных паров [1]. Импульсы наносекундной длительности излучения 946 нм применяются в системах диагностики плазмы методом Томсоновского рассеяния [2]. Излучение второй гармоники с длиной волны 473 нм используется в подводных коммуникациях, так как вода имеет минимум поглощения вблизи 450 нм, в спектроскопии и биотехнологиях [3].

Многие из этих применений требуют высокой пиковой мощности и, соответственно, короткой длительности импульса. Модуляция добротности – общепринятый способ получения коротких лазерных импульсов наносекундной длительности [4]. Уменьшение длительности импульса, как правило, достигается путем уменьшения длины резонатора и/или увеличения значения превышения накачки над порогом генерации [5]. Существенное превышение накачки над порогом за счет коэффициента усиления затруднено для перехода  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  в Nd:YAG, из-за малого значения сечения вынужденного перехода  $\sigma_{946}=0,37 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ , а также из-за конкуренции с переходом  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  на 1064 нм. В свою очередь увеличение превышения накачки над порогом за счет уменьшения потерь ведет к увеличению внутрирезонаторной энергии и связанным с данным увеличением термическим напряжениям приводящим к разрушению оптических элементов резонатора. Применение акустоопической [6] или электро-опической модуляции добротности [7] позволяет получить импульсы длительностью не менее 10 нс с выходной энергией мДж уровня.

Лазеры на длине волны 946 нм с меньшей длительностью импульса представлены в литературе микрочип лазерами [8, 9]. В работе [9] продемонстрирован микрочип лазер на длине 946 нм с длительностью импульса 3,7 нс. Активный элемент был дополнительно легирован насыщающимся поглотителем на основе Cr<sup>4+</sup>, выполняющим функцию пассивного затвора. Длина резонатора составляла 1,5 мм. Диаметр пятна накачки составлял 40 мкм. Достигнутая выходная энергия не превышала 0,9 мДж. Использование пассивного затвора приводило к значительной нестабильности положения выходного импульса во времени.

Одним из методов получения короткой длительности импульса является метод разгрузки резонатора предложенный Вейлстеке в 1963 году [10]. Основная идея метода состоит в том, чтобы инициировать развитие моноимпульса с произвольной длительностью в отсутствии потерь на выходе, а затем, при максимальном значении внутрирезонаторной энергии, вывести ее за время одного обхода резонатора с помощью оптического ключа. Длительность выходного импульса  $\tau$ , в этом случае, не

зависит от значения превышения накачки над порогом генерации, а зависит только от длины резонатора  $L$  как  $t=2L/c$  [10], где  $c$  – скорость света. Минимальная длительность импульса ограничена временем переключения оптического ключа и габаритными размерами оптических элементов.

В настоящее время метод разгрузки резонатора широко применяется для генерации коротких наносекундных импульсов на высокой частоте следования [11]. При частотах следования импульса сравнимых с величиной обратного времени жизни верхнего лазерного уровня, длительность импульса, полученного методом модуляции добротности, сильно зависит от частоты, так как инверсия населенности зависит от времени запасания энергии активной средой. В отличии от метода модуляции добротности, метод разгрузки резонатора не чувствителен к изменению инверсии населенности и позволяет генерировать импульсы стабильной длительности вне зависимости от частоты следования. В работе [11] был использован метод разгрузки резонатора для получения импульсов длительностью 3,8 нс на частоте следования импульсов до 50 кГц в  $\text{YVO}_4\text{Nd:GdVO}_4$  работающего на длине волны 1064 нм.

Особенно эффективно метод разгрузки резонатора используется для получения коротких импульсов наносекундной длительности в средах с низким значением сечения вынужденного перехода. Недавно была продемонстрирована импульсная генерация излучения 2 мкм диапазона в лазерах на кристаллах Tm:YAP и Tm:LuAG с длительностью импульсов 7,1 нс и 2 нс соответственно [12]. Данные активные среды имеют низкое значение сечения вынужденного перехода  $\sim 10^{-20} \text{ см}^2$ .

Настоящая работа посвящена 946 нм Nd:YAG лазеру с разгрузкой резонатора. Применение метода разгрузки резонатора позволило получить импульсы длительностью до 1,6 нс с выходной энергией до 2,5 мДж. Джиттер выходного импульса не превышал 1 нс. Частота повторения импульсов 50 Гц.

**Оптическая схема.** Оптическая схема разработанного лазера представлена на рис. 1.

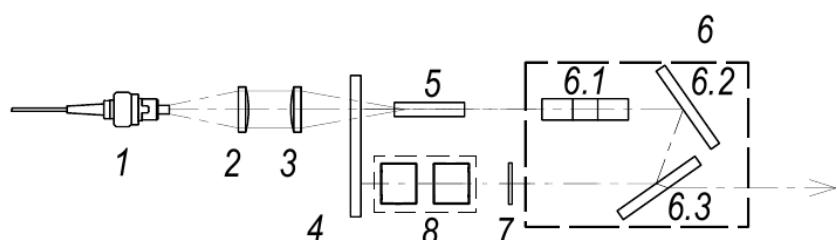


Рис. 1. Оптическая схема лазера с разгрузкой резонатора: 1 – волоконный вывод сумматора лазерных диодов; 2,3 – линзы накачки; 4 – селективное зеркало; 5 – активный элемент; 6 – ретрорефлектор; 6.1 – призма Дове; 6.2 –  $35^\circ$  зеркало; 6.3 – поляризатор; 7 – фазовая пластина  $\lambda/4$ ; 8 – электрооптический затвор

Активный элемент Nd:YAG (1)  $\varnothing 4 \times 20$  мм с концентрацией ионов неодима 0,5 ат.-% помещен в медный теплоотвод. Сумматор лазерных диодов с волоконным выводом и выходной мощностью до 500 Вт, работающий на длине волны 808 нм, использовался для продольной накачки активного элемента. Линзы (2) и (3) переносили распределение поля накачки с торца волокна в центр активного элемента с увеличением 1,4. Накачка фокусировалась в центр активного элемента в пучок диаметром 1,1 мм. Слабосигнальное усиление в активной среде на длине волны 946 нм составляло  $G_{946} \approx 1,6$ , что соответствовало усилию  $G_{1064} \approx 50$  на длине волны 1064 нм.

Селективное зеркало 4 линейного резонатора обладало высоким коэффициентом отражения излучения на длине волны 946 нм  $\sim 99,9\%$  и высоким пропусканием излучения на длинах волн 808 и 1064 нм ( $\sim 95\%$  и  $\sim 90\%$ , соответственно).

Ретрорефлектор 6 был сформирован призмой Дове 6.1,  $35^\circ$  зеркалом с отражением 99%, позволявшим контролировать плотность внутрирезонаторной энергии 6.2 и поляризатором 6.3. Совместно с зеркалом 4 ретрорефлектор образовывал резонатор не чувствительный к разъюстировкам. Настройка длительности импульса осуществлялась путем перемещения ретрорефлектора вдоль оптической оси резонатора. Точная юстировка резонатора осуществлялась с помощью пары юстировочных клиньев, вращающихся независимо друг от друга.

Фазовая пластина  $\lambda/4$  7 обеспечивала низкую добротность резонатора в отсутствии четвертьволнового напряжения на электрооптическом затворе (ЭОЗ) 8. ЭОЗ 8, высоковольтный драйвер, управляющий ЭОЗ, и поляризатор 6.3 составляли оптический ключ. Оптический ключ инициировал развитие импульса путем переключения добротности резонатора до максимального значения при подаче четвертьволнового напряжения на ЭОЗ. Снятие напряжения с ЭОЗ обеспечивало вывод внутрирезонаторной энергии за время одного обхода резонатора. Высоковольтный драйвер ЭОЗ позволял осуществлять как метод модуляции добротности, так и метод разгрузки резонатора. Это обеспечивалось за счет регулировки длительности высоковольтного импульса прикладываемого к ЭОЗ.

**Модуляция добротности.** Для определения параметров выходного импульса полученного методом разгрузки резонатора, мы воспользовались тем, что развитие импульса в глухом резонаторе при модуляции добротности полностью соответствует второму этапу формирования импульса методом разгрузки резонатора.

Зависимость выходной энергии лазера  $E_R$  и длительности импульса от значения превышения порога измерялась через зеркало 6.2 (рис. 1) с отражением  $R=98,5\%$ . Плотность внутрирезонаторной энергии  $E_{cav}$  воздействующей на зеркало 13 вычислялась как:

$$E_{cav} = E_R \frac{1+R}{1-R}. \quad (1)$$

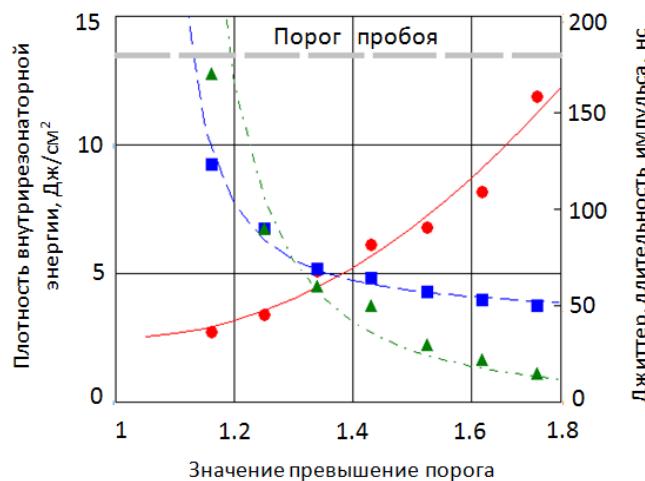


Рис. 2. Графики зависимости внутрирезонаторной плотности энергии, длительности импульса и джиттера от величины превышения накачки над порогом при модуляции добротности: ● – экспериментальное значение внутрирезонаторной плотности энергии; — — аппроксимация зависимости внутрирезонаторной плотности энергии; ■ – экспериментальное значение длительности импульса; — — аппроксимация зависимости длительности импульса; ▲ – экспериментальное значение джиттера; — — аппроксимация зависимости джиттера

Минимальная длительность импульса полученного методом модуляции добротности при длине резонатора 48 см составляла 50 нс. Графики

внутрирезонаторной энергии, длительности импульса и пикового значения джиттера от значения превышения накачки над порогом представлены на рис. 2. Контроль за внутрирезонаторной энергией осуществлялся с помощью зеркала 6.2 показанного на рис. 1. Значение порога пробоя оптических покрытий  $\sim 14$  Дж/см $^2$  было определено экспериментально.

Для получения стабильной выходной энергии методом разгрузки резонатора необходимо минимизировать значение джиттера выходного импульса. Для этого необходимо увеличить значение превышения накачки над порогом, что приводит к увеличению внутрирезонаторной энергии. Верхним пределом возможного увеличения внутрирезонаторной энергии служит порог пробоя оптических покрытий. Экспериментально полученное минимальное значение джиттера импульсной генерации составило 15 нс при плотности внутрирезонаторной энергии 12,5 Дж/см $^2$ .

**Разгрузка резонатора.** Метод разгрузки резонатора обеспечивался при обеспечении условия соответствия длительности высоковольтного импульса ЭОЗ времени развития моноимпульса в резонаторе. Данный метод позволил получить импульсы длительностью 3,2 нс при длине резонатора 48 см. Выходная энергия импульса составляла 2,5 мДж (рис. 3, а). Оптимизация значения превышения накачки над порогом позволяла достичь 2% RMS выходной энергии. Джиттер выходного импульса лазера полностью определялся нестабильностью высоковольтного импульса драйвера ЭОЗ во времени и не превышал 1 нс.

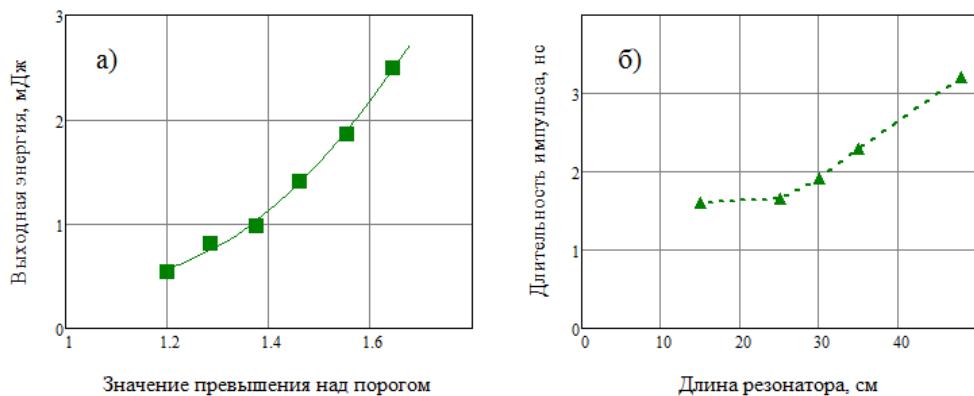


Рис. 3. Зависимости выходной энергии от значения превышения накачки над порогом (а) и длительности выходного импульса от длины резонатора (б)

Значение дифференциального КПД преобразования поглощенной энергии в энергию импульса увеличивается с увеличением уровня накачки и достигает 11,5%. Значение поглощенной энергии при этом составляет 63 мДж. Низкое значение дифференциального КПД лазера обусловлено низким значением превышения порога 1,65 и высоким значением плотности насыщающей энергии перехода  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  (5,7 Дж/см $^2$ ).

При уменьшении длины резонатора до 24 см, длительность импульса уменьшалась до 1,6 нс. Момент вывода излучения из резонатора и энергия накачки подбирались для каждой длины резонатора. Максимальное значение выходной энергии 2,5 мДж не зависело от длины резонатора. Уменьшение длины резонатора менее 24 см приводило к тому, что время обхода становилось меньше времени переключения оптического ключа и уменьшения длительности импульса не происходило. Зависимость длительности импульса от длины резонатора представлена на рис. 3, б.

Длительности выходных импульсов измерялись с помощью осциллографа Agilent MSO7052A и фотоприемника ПОС-1. Осциллограммы, записанные в режиме усреднения импульсов, представлены на рис. 4.

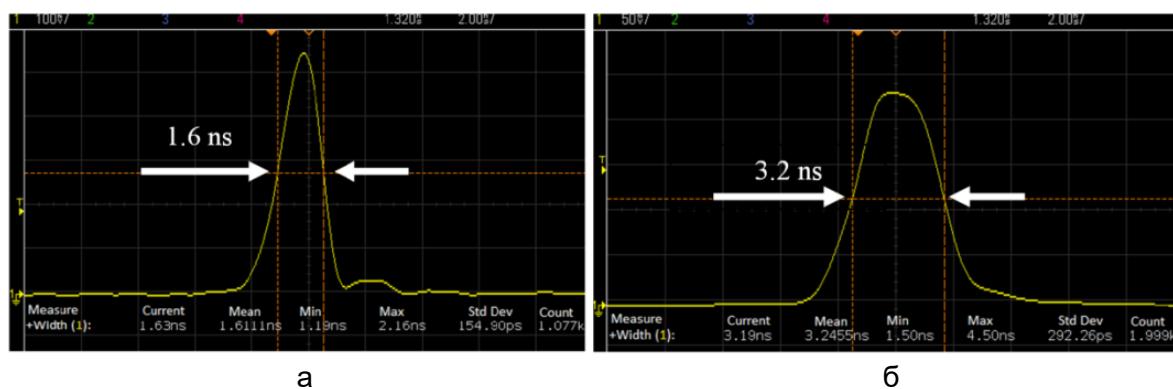


Рис. 4. Осциллограмма формы выходного импульса при длине резонатора: 15 см (а) и 45 см (б)

Малое число Френеля резонатора  $N_a \sim 1$ , полученное за счет малого диаметра пучка накачки  $d=1,1$  мм и длины резонатора  $L=26$  см, позволило получить лазерный пучок высокого качества с  $M^2 < 1,2$ . Профиль распределения интенсивности пучка в дальней зоне представлен на рис. 5.

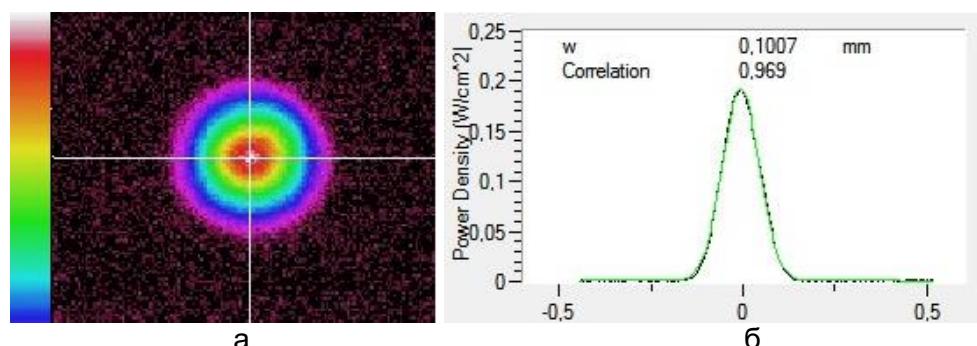


Рис. 5. 3D (а) и 2D (б) профили интенсивности пучка в дальней зоне

**Заключение.** Метод разгрузки резонатора использован для получения импульсной генерации в Nd:YAG лазере на длине волны 946 нм. Получены импульсы с длительностью от 1,6 нс до 3,2 нс и выходной энергией импульса до 2,5 мДж. Джиттер выходного импульса не превышал 1 нс. Продемонстрировано, что метод разгрузки резонатора является надежным методом получения коротких наносекундных импульсов мДж уровня на длине волны 946 нм в Nd:YAG.

## Литература

1. Stenholm I., DeYoung R.J. Ultra narrowband optical filters for water vapor differential absorption lidar (DIAL) atmospheric measurements (R) NASA // NASATM. – 2001. – P. 211261.
2. Mukhin E., Pitts R., Andrew P., Bukreev I., Chernakov P., Giudicotti L., Huijsmans G., Kochergin M., Koval A., Kukushkin A., Kurskiev G., Litvinov A., Masyukevich S., Pasqualotto R., Razdobarin A., Semenov V., Tolstyakov S. and Walsh M. Physical aspects of divertor Thomson scattering implementation on ITER // Nucl. Fusion. – 2014. – V. 54. – P. 043007.
3. Risk W.P., Gosnell T.R., Nurmikko A.V. Compact Blue-Green Lasers. – New York: Cambridge University Press, 2003. – 540 p.
4. Koechner W. Solid-State Laser Engineering. – Berlin: Springer, 2006. – 747 p.
5. Degnan J.J. Theory of the optimally coupled Q-switched laser // IEEE J. Quantum Electron. – 1989. – V. 25. – P. 214–220.

6. Yu X., Wang C., Chen F., Yan R.P., Li X.D., Peng J.B. and Yu J.H. High repetition rate, high peak power acousto-optical Q-switched 946 nm Nd:YAG laser // *Laser Physics*. – 2010. – V. 20. – № 9. – P. 1783–1786.
7. Huang J., Hu X. and Chen W. Electro-optically Q-switched 946 nm laser of a composite Nd:YAG crystal 1 // *Chinese Optics Letters* – 2015. – V. 13. – № 2. – P. 21402–21402.
8. Kimmelman O., Kaivola M., Tittonen I. and Buchter S. Short pulse, high peak power, diode pumped, passively Q-switched 946 nm Nd:YAG laser // *Optics Communications*. – 2007. – V. 273. – № 2. – P. 496–499.
9. Lv L., Wang L., Fu P. and Chen X. Diode-pumped self-Q-switched single-frequency 946-nm Nd<sup>3+</sup>,Cr<sup>4+</sup>:YAG microchip laser // *Optics letters* – 2001. – V. 26. – № 2. – P. 72–74.
10. Vuylsteke A.A. Theory of laser regeneration switching // *Journ. Appl. Phys.* – 1963. – V. 34. – P. 1615.
11. Ma Y., Li X., Yu X., Yan R., Fan R., Peng J., Xu X., Bai Y., and Sun R. High-repetition-rate and short-pulse-width electro-optical cavity-dumped YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> laser // *Applied Optics*. – 2014. – V. 53. – № 14. – P. 3081–3084.
12. Zhang Y., Yao B., Dai T., Shi H., Han L., Shen Y. and Ju Y. Electro-optically cavity-dumped 3ns Tm:LuAG laser // *Applied Optics*. – 2016. – V. 55. – № 11. – P. 2848–2851.

УДК 535.421, 535.417

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ РАССЕЯНИЯ В ОБЪЕМНЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ НА ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ

Козлова Д.А.<sup>1</sup>, Иванов С.А.<sup>1</sup>, Сгибнев Е.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Никоноров Н.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

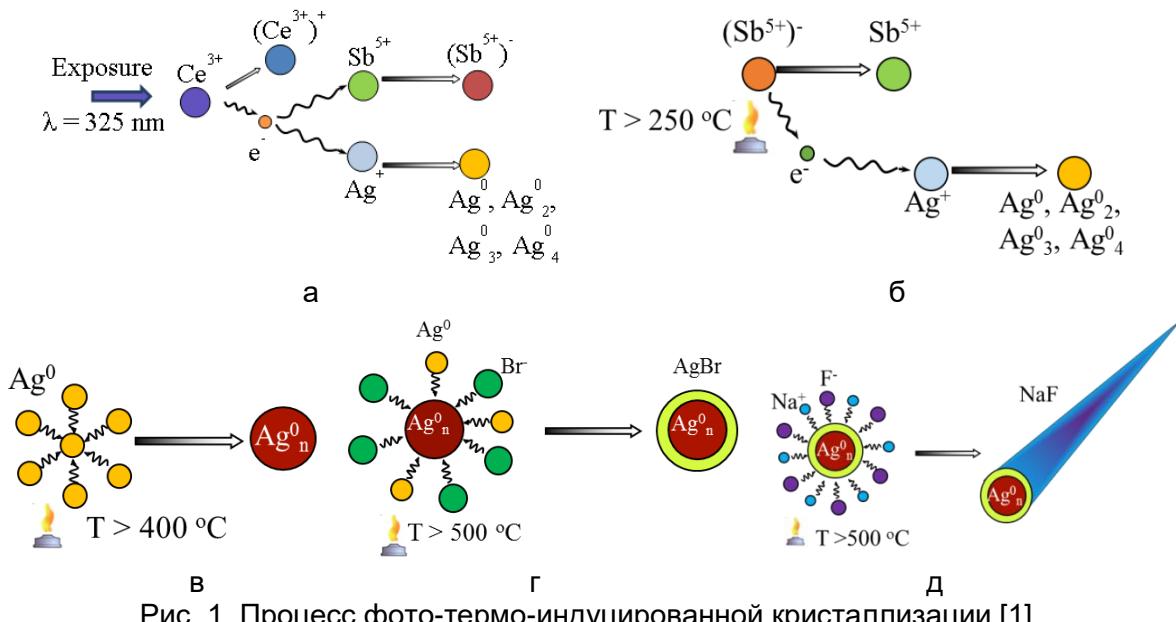
В работе исследовались различные методы снижения рассеяния в объемных брэгговских решетках на фото-термо-рефрактивном стекле такие как: уменьшение размера кристаллической фазы, разрушение серебряных наночастиц, глубокая шлифовка-полировка и ионный обмен. По результатам исследования были подобраны режимы обесцвечивания и ионного обмена, а также произведена оценка влияния каждого из рассматриваемых методов.

**Ключевые слова:** фото-термо-рефрактивное стекло, ФТР стекло, процесс фото-термо-индуцированной кристаллизации, ФТИК, объемная брэгговская решетка, голограмма, угловая селективность, амплитуда модуляции показателя преломления, обесцвечивание, глубокая шлифовка-полировка, ионный обмен, рассеяние.

**Введение.** Фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло является многокомпонентным материалом, в состав которого входят стеклообразователи, модификаторы и следующие фоточувствительные добавки: церий, серебро, олово и сурьма. Кроме этого в состав ФТР стекла входят галогениды – фториды и бромиды.

Благодаря высокой термической, химической и механической стойкости, ФТР стекло применяется без каких-либо защитных покрытий. Записанные на нем голограммы могут работать при высоких температурах (до 450°C), сохраняя свои спектральные и оптические свойства.

ФТР стекло и записанные на нем оптические элементы обладают таким достоинством как: высокое изменение показателя преломления ( $\Delta n \sim 3 \times 10^{-3}$ ), высокая дифракционная эффективность (до 100%), долгий срок хранения (десятки лет) и малое рассеяние после записи решеток. Диапазон прозрачности голограмм, полученных на таком материале, от 350 до 2500 нм.



Процесс создания брэгговских решеток на ФТР стекле основан на фото-термо-индуцированной кристаллизации (ФТИК) стекла (рис. 1), в результате которой в объеме выделяются нанокристаллы (НК) фторида натрия в виде игл длиной 100–150 нм

(рис. 1, д). Центрами кристаллизации для НК являются наночастицы серебра (рис. 1, в), максимум поглощения, которых приходится на 450 нм, однако, экспоненциальные хвосты полосы поглощения могут тянуться в ближнюю ИК область. Обесцвечивание записанных голограмм позволяет снизить рассеяние и поглощение как в видимой области спектра, так и в ближнем ИК диапазоне. Так как процесс термообработки (ТО) протекает вблизи температуры стеклования, из поверхностного слоя активно выделяется фтор, который при завершении ТО оседает на поверхности в виде кристаллов NaF. Таким образом, источниками рассеяния могут служить как поверхностные, так и объемные эффекты, возникающие в процессе ТО стекла. В связи с этим разработка методов снижения рассеяния в объемных брэгговских решетках на ФТР стекле является весьма актуальной задачей. В результате работы планируется получить данные об эффективности таких методов снижения рассеяния как: обесцвечивание, снижение температуры ТО, ионный обмен, глубокая шлифовка-полировка (ГШП).

**Эксперимент.** Для проведения эксперимента на базе научно-исследовательского центра Оптического материаловедения было синтезировано ФТР стекло. Были подготовлены образцы, которые представляют собой плоскопараллельные пластины размером  $10 \times 10$  мм, толщиной 600 мкм. Экспозиция для каждой голограммы составила 1 Дж/см<sup>2</sup>.

Для проведения ТО были выбраны стандартная температура 505°C и заниженная 490°C. Время ТО составило 30 и 60 ч соответственно. Выбор времени обусловлен необходимостью получить максимальное значение изменения показателя преломления  $\Delta n$ . Предварительные измерения показали, что данные режимы ТО позволяют достичь одинакового  $\Delta n$ .

Обесцвечивание записанных голограмм проводилось импульсным лазером с длиной волны 532 нм, длительность импульса 8 нм. Мощность энергии составила 10 мДж, время обесцвечивания 5 мин, диаметр пятна засветки 2 мм.

Для улучшения качества поверхности проводилась глубокая шлифовка-полировка, в результате которой сняли 20 мкм толщины.

Следующим способом уменьшения рассеяния является упрочнение поверхности брэгговских решеток с помощью ионного обмена (ИО). Для исследования был взят чистый расплав KNO<sub>3</sub>. Использование указанного калиевого расплава является наиболее простым способом проведения ИО, не требующим повышения температуры или увеличения времени, а также другого внешнего воздействия. ИО проводился при двух температурах 350°C и 400°C в течении 3, 6 и 9 ч. Указанные температуры обеспечивают достаточно высокие коэффициенты диффузии, а также предотвращает релаксацию напряжений.

**Результаты.** Для тестирования записанных решеток производился расчет амплитуды модуляции показателя преломления  $n_1$  производился с учетом контуров угловой селективности. Для всех решеток  $n_1$  находится в диапазоне от  $11,386 \cdot 10^{-4}$  до  $12,6 \cdot 10^{-4}$ .

После ИО проводилась оценка двулучепреломления путем измерения модовой структуры ионообменных волноводов. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Оценка двулучепреломления

Режим ИО		Величина двулучепреломления
350°C	3 ч	0,0019
	6 ч	0,0015
	9 ч	0,0017

Режим ИО		Величина двулучепреломления
400°C	3 ч	0,0012
	6 ч	0,0015
	9 ч	0,0005

По результатам проведения ИО при разных параметрах был выбран оптимальный режим: 350°C в течении 3 ч (рис. 2).

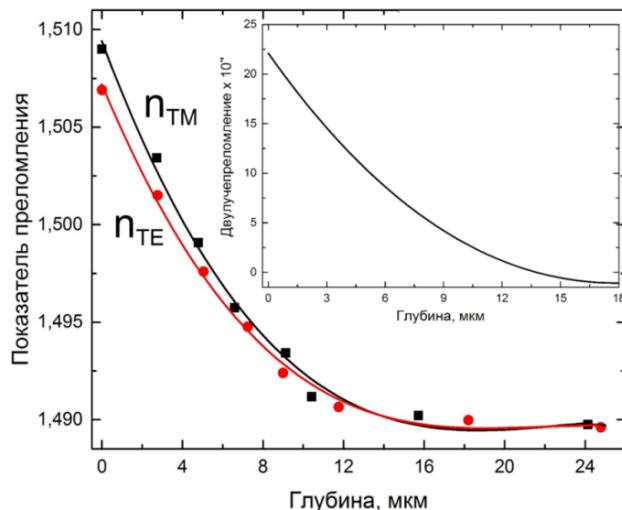


Рис. 2. Профиль показателя преломления (а) и профиль двулучепреломления (б) ионообменных волноводов, полученных после ИО при температуре 350°C в течении 3 ч

На каждом из этапов проводилось измерение степени рассеяния. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Измерение степени рассеяния в объемных брэгговских решетках

	После ТО	Обесцвечивание	ГШП	ИО
505°C				
CP*	$8,26 \cdot 10^{-5}$	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$1,70 \cdot 10^{-5}$
490°C				
CP*	$5,09 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$

\*CP – степень рассеяния.

Как видно по данным из табл. 2 каждый из методов снижает рассеяние, однако ИО несколько ухудшил качество поверхности. Предполагается, что это связано с чистой раствором  $\text{KNO}_3$ . Для подтверждения необходимо провести повторное

исследование. Также видно, что в результате ТО при высокой температуре ухудшается качество поверхности, что связано с выделением фтора из поверхностного слоя и последующим его осаждением на поверхности образца. Данных эффект можно устранить с помощью ГШП.

**Заключение.** В результате проведения эксперимента был выбран оптимальный режим ионного обмена: обработка образцов в калиевом расплаве при температуре 350°C в течение 3 ч.

По результатам работы можно сказать, что все перечисленные методы снижают рассеяние в объемных брэгговских решетках на ФТР стекле.

### **Литература**

1. Nikonorov N.V., Ivanov S.A., Dubrovin V.D., Ignatiev A.I. New Photo-Thermo-Refractive Glasses for Holographic Optical Elements: Properties and Applications // Holographic Materials and Optical Systems. – 2017. – Глава 19. – 435 p.

УДК 535.8, 535.317

## ГАБАРИТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И РАСЧЕТ СИСТЕМ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА БАЗЕ ЦЕНТРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Романова Г.Э.<sup>1</sup>, Конева Т.А.<sup>1</sup>, Сидоров В.И.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н., доцент Романова Г.Э.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены варианты организации схем систем дополненной реальности на базе центрированных элементов. Выполнен габаритный расчет систем с промежуточным изображением и без промежуточного изображения. Проанализированы габаритные ограничения возможности использования различных источников изображения (смартфон и микродисплей).

**Ключевые слова:** дополненная реальность, габаритный расчет, комбинер, микродисплей, смартфон.

**Введение.** Оптические системы дополненной реальности находят множество применений как в индустрии развлечений (кино, игры, виртуальное посещение мероприятий и др.), так и для образовательных и технических целей. Среди систем такого типа можно выделить те, в которых дополнительное изображение накладывается на изображение окружающего мира, видимое наблюдателем напрямую. Второй тип систем – где объединение изображений окружающего мира и дополненного происходит за счет цифровых методов.

В работе рассматриваются особенности построения схем систем первого типа. В данном случае необходимо вывести источник изображения (экран смартфона или микродисплей) из поля зрения оператора и обеспечить наложение построенного изображения на окружающую среду. Для этого в простейшем случае можно использовать плоские наклонные полупрозрачные зеркала [1–3]. Дополнительное плоское наклонное зеркало может служить само по себе комбинером – элементом, выполняющим функцию объединения изображений. Однако такое решение при достаточно широком поле зрения будет приводить к значительным габаритам.

**Схема с силовым комбинером.** Один из вариантов организации системы дополненной реальности – использование силового комбинера с дополнительным плоским наклонным зеркалом [4]. Можно выделить два вида схемы в этом случае: с промежуточным изображением после силового зеркала и без промежуточного изображения (рис. 1).

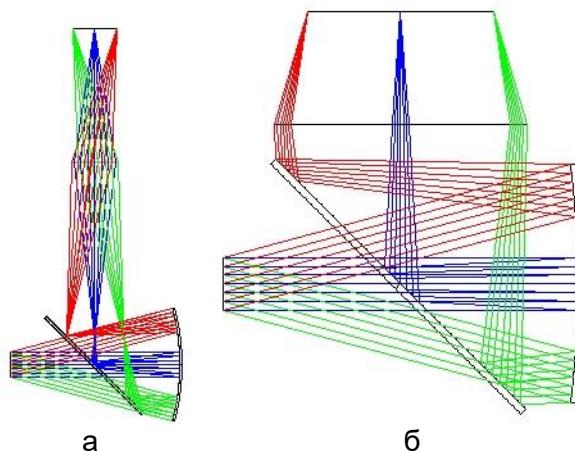


Рис. 1. Принципиальные схемы системы дополненной реальности с дополнительным наклонным зеркалом: с промежуточным изображением (а); без промежуточного изображения (б)

Каждая из схем обладает некоторыми достоинствами, однако имеет и ограничения с точки зрения возможности использования различных генераторов изображения для достижения желаемых характеристик.

Для расчета и моделирования были выбраны смартфон с размерами экрана  $62 \times 110$  мм<sup>2</sup>, разрешением экрана  $720 \times 1280$  pix и микродисплей с диагональю  $2y'=19,67$  мм, разрешением экрана  $1024 \times 1280$  pix [5]. Диагональ половины экрана смартфона  $2y'=82,8$  мм.

**Расчет системы без промежуточного изображения.** Очевидное преимущество схемы без промежуточного изображения – относительно небольшие габариты. В этом случае конструктивно систему можно оформить в виде очков, аналогичным очкам виртуальной реальности.

Рассмотрим систему дополненной реальности со смартфоном в качестве источника изображения [6]. Фокусное расстояние системы связано с угловым полем зрения и с размером изображения следующей формулой:

$$y' = f'_{\text{сист}} \operatorname{tg} w'. \quad (1)$$

Если угловое поле зрения в пространстве изображений  $w'=20^\circ$ , то фокусное расстояние системы  $f'_{\text{сист}} = 115$  мм.

Для сокращения габаритов и aberrационной коррекции после диагонального зеркала устанавливается положительная линза. Тогда фокусное расстояние системы будет зависеть от фокусного расстояния зеркала  $f'_3$  и линзы  $f'_L$ , а также расстояния  $L$  между ними:

$$f'_{\text{сист}} = \frac{f'_3 f'_L}{f'_3 + f'_L - L}. \quad (2)$$

Обозначим расстояние от глаза пользователя до диагонального зеркала за  $a$ , от диагонального зеркала до силового за  $b$ , а полувысоту силового зеркала за  $h$  (рис. 2, а) [7]. Полувысота зеркала  $h$  зависит от углового поля зрения и от расстояния до него следующим образом:

$$h = (a + b) \operatorname{tg} w'. \quad (3)$$

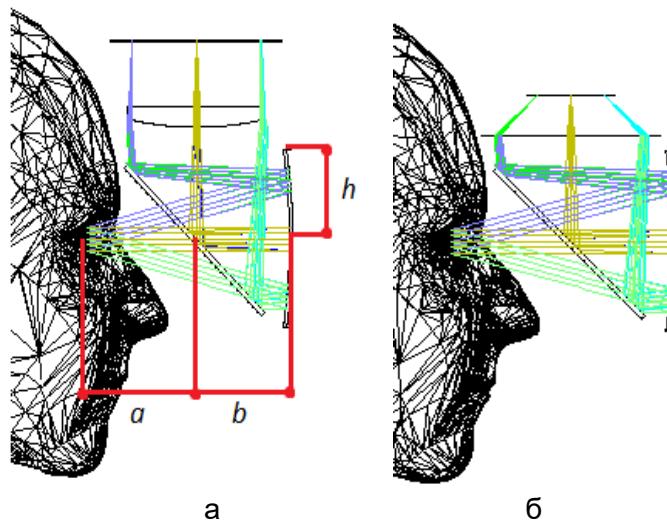


Рис. 2. Схема со смартфоном в качестве источника изображения (а); с дисплеем с диагональю экрана  $y'=20$  мм (б)

Расстояния  $a$  и  $b$  определяются размером диагонального зеркала и полем зрения. Таким образом, минимальный размер источника изображения помимо фокусных расстояний силовых элементов будет определяться минимально возможными

значениями  $a$ ,  $b$  и  $L$ . В данном случае расстояние от глаза пользователя до диагонального зеркала  $a$  должно быть не менее 55 мм, а расстояние от диагонального зеркала до силового  $b$  – не менее 40 мм. Тогда  $h$  будет больше 35 мм. Соответственно, расстояние от силового зеркала до линзы  $L$  должно быть больше суммы  $b$  и  $h$ , т.е. не менее 75 мм.

В данной схеме минимально возможный размер источника изображения  $y' = 20$  мм ( $f'_{\text{сист}} = 55$  мм при  $w' = 20^\circ$ ). Пример схемы показан на рис. 2, б, где линза заменена параксиальным элементом. Использовать микродисплей меньшего размера с сохранением величины поля зрения в виду габаритных ограничений не представляется возможным.

Схема системы, разработанная для использования совместно со смартфоном, приведена на рис. 3. Зрачок системы составляет 15 мм, что значительно больше зрачка глаза наблюдателя, что позволяет исключить необходимость точного позиционирования в процессе эксплуатации. В системе использованы только сферические поверхности. Основная проблема в этом случае – линза большого диаметра, которая вносит основной вклад в массу системы. При использовании ПММА масса линзы составит порядка 160 г (на один канал).

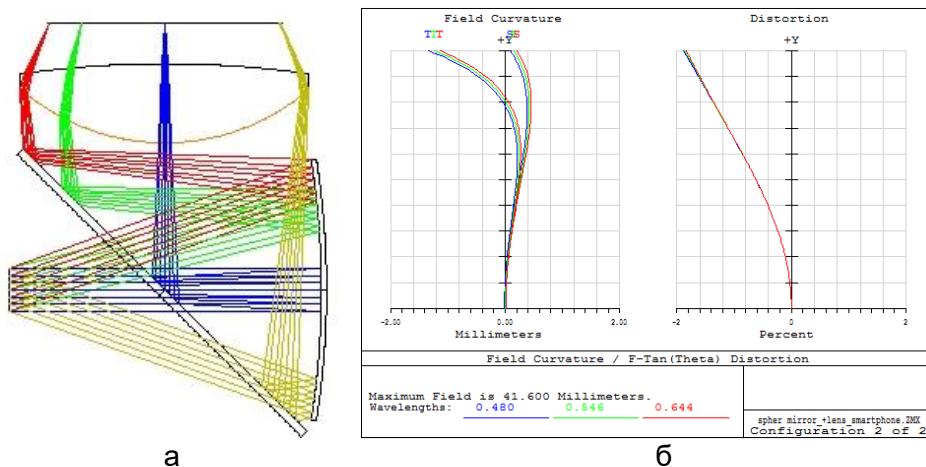


Рис. 3. Система без промежуточного изображения на базе элементов со сферическими поверхностями: схема с ходом лучей (а); астигматические отрезки и дисторсия (б)

Следует отметить, что достаточное качество изображения в схеме получается при использовании монохромного изображения. Т.е., необходим специальный контент, разработанный в виде приложений для смартфона, например, монохромный навигатор или монохромная схема помещения или другая обучающая или развлекательная программа.

Разработка оптической схемы под миниатюрный микродисплей по такой схеме представляет определенные сложности. На рис. 4 показан возможный вариант системы, рассчитанный на работу с микродисплеем с диагональю 22 мм.

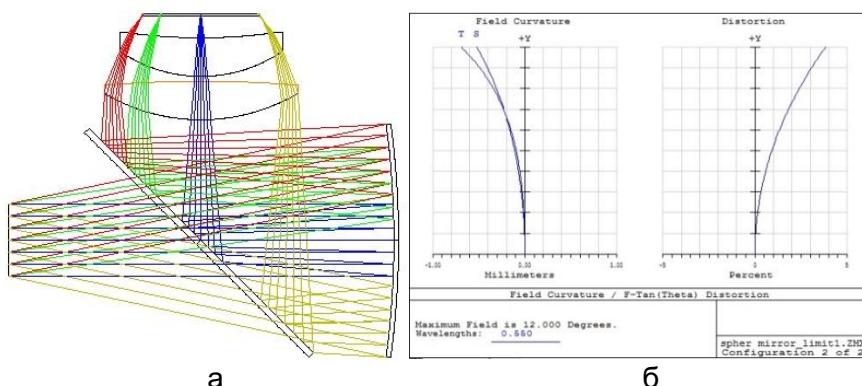


Рис. 4. Система без промежуточного изображения на базе элементов со сферическими поверхностями: схема с ходом лучей (а); астигматические отрезки и дисторсия (б)

Система имеет фокусное расстояние  $f=55$  мм и угловое поле в пространстве предметов  $2\omega=24^\circ$ , что является практически предельными характеристиками для такого типа схемы.

**Расчет системы с промежуточным изображением.** Как видно на примере предыдущей системы – основной проблемой являются габариты линз. Меньшие габариты линз можно получить, выбирая оптимальное положение линзовых компонентов в системе.

При разработке вариант с промежуточным изображением наиболее выгодным с точки зрения массы системы будет использование малогабаритного дисплея. Такого типа системы можно найти в [8]. Даже при использовании 4 линз для обеспечения цветного изображения (две пары линз, из ПММА и поликарбоната) масса линз системы составляет примерно 15 г. Однако по такой схеме можно рассчитать и систему со смартфоном.

На рис. 5 приведены результаты расчета схемы. Использованы две полимерные линзы, одна из которых – с асферической поверхностью второго порядка. Масса линз составляет 73 г (на один канал). Система получается достаточно длинной, однако при проработке конструкции можно предусмотреть оптимальный баланс на голове пользователя, чтобы минимизировать утомляемость из-за большого веса.

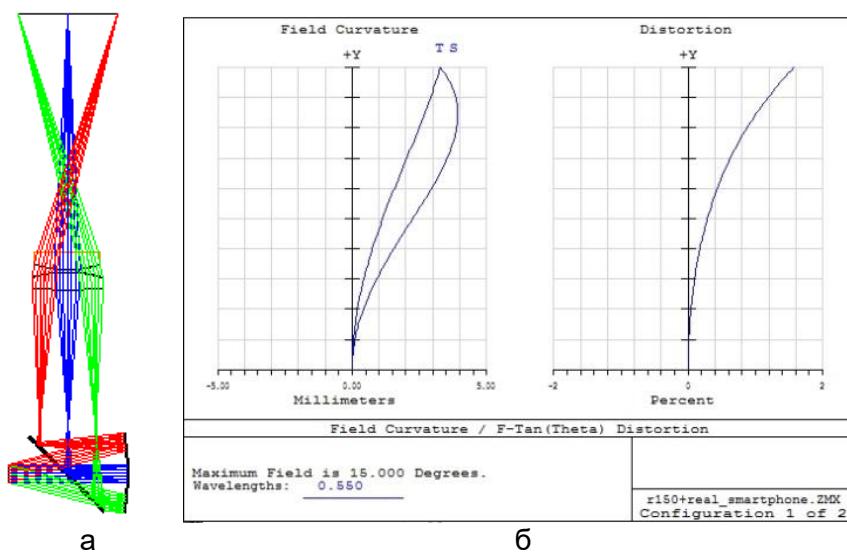


Рис. 5. Оптическая схема со смартфоном в качестве источника изображения: схема с ходом лучей (а); астигматические отрезки и дисторсия (б)

**Заключение.** В работе рассмотрены варианты организации схем систем дополненной реальности на базе центрированных элементов. Выполнен габаритный расчет систем с промежуточным изображением и без него. Проанализированы габаритные ограничения возможности использования различных источников изображения (смартфон и микродисплей).

## Литература

1. Artishchev A.B. Study of versions of the arrangement of an augmented-reality optical system built into a motorcycle helmet // Journal of Optical Technology. – 2016. – V. 83. – № 12. – P. 773–782.
2. Патент США № 5822127, 10.13.1998. Low-cost light-weight head-mounted virtual-image projection display with low moments of inertia and low center of gravity / Chungte W. Chen, Uzi Efron, Arthur N. Chester.

3. Патент РФ №: 2007146758/28, 10.12.2007. Оптическая система нашлемного коллиматорного дисплея // Патент России № 2353958. 2009. Бюл. № 12. / Ган М.А., Бармичева Г.В., Старков А.А., Щеглов С.А., Ган Я.М.
4. Tehrani M., Mousavi F. Design of Diffraction Limited Head Mounted Display Optical System Based on High Efficiency Diffractive Elements // Current Optics and Photonics. – 2017. – V. 1. – № 2. – P. 150–156.
5. 1280 X 1024. Low power monochrome green XLT amoled microdisplay [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://emargin.com/>, своб.
6. Koneva T.A., Romanova G.E. Design of the augmented reality system with the smartphone as a source of image // Optical Design and Engineering VII. – 2018. – V. 10690. – P. 106901V.
7. Human Head (NURBS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thingiverse.com/thing:172348>, своб.
8. Sidorov V.I., Romanova G.E. Design and analysis of a simple augmented reality optical system with AMOLED microdisplay // Optical Design and Engineering VII. – 2018. – V. 10690. – P. 106901S.

УДК 535.34, 535.37

**ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПЛАСТИН СУЛЬФИДА СВИНЦА В ХОДЕ ПРОЦЕССОВ РОСТА И ДЕГРАДАЦИИ ДВУМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ****Кормилина Т.К.<sup>1</sup>, Скурлов И.Д.<sup>1</sup>, Мудрак А.С.<sup>1</sup>****Научный руководитель – к.ф.-м.н., н.с. Черевков С.А.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Университет ИТМО

В данной работе идет речь о плоских двумерных нанокристаллах (нанопластинах) сульфида свинца. Рассматриваются детали получения подобных наноструктур методами органического синтеза. С помощью техник абсорбционной и люминесцентной спектроскопии выявляются их оптические характеристики. Отдельное внимание уделено эволюции нанопластины в коллоидном растворе. Рассмотрены процессы роста и деградации структуры нанопластины, а также соответствующие им изменения в оптических свойствах нанокристаллов.

**Ключевые слова:** нанопластины, сульфид свинца, нанокристаллы, наноструктуры, органический синтез, коллоидные наночастицы, люминесценция, поглощение, деградация.

**Введение.** В рамках неутихающего интереса к материалам с двумерной морфологией, который существует в современной коллоидной нанофотонике, особое внимание привлекают двумерные аналоги хорошо зарекомендовавших себя полупроводниковых нанокристаллов. Например, в видимом диапазоне нанопластины и наноленты селенида кадмия заменили для многих задач квантовые точки благодаря их улучшенным оптическим параметрам [1]. Перспективной является задача получения двумерных аналогов для полупроводниковых нанокристаллов ближнего ИК диапазона. Для этой задачи прекрасно подходят соединения свинца и ртути, однако механизмы роста и процедуры синтеза двумерных наноструктур для этих материалов являются в определенной области более сложными и менее изученными, чем для соединений кадмия [2, 3]. Разработка протоколов синтеза нанопластины сульфида свинца PbS, которые бы давали стабильные образцы нанокристаллов с эффективными оптическими параметрами, является таким образом актуальной задачей. Такие структуры являются востребованными для обогащения создания светодиодов, солнечных ячеек, а также изучения нелинейных эффектов в ближнем ИК диапазоне [4].

**Синтез.** Нанопластины PbS были получены по модифицированной методике из [5]. В трехгорлую колбу объемом, снабженную насадками для вакуумной сушки, продувки аргоном, конденсором, термопарой и впрыска реагентов посредством шприца вводился дифенилэфир, олеиновая кислота, и трехводный ацетат свинца.

Колба дегазировалась при 85°C 1 ч, затем остужалась в атмосфере аргона до 35°C. Далее в реакционную колбу вводился хлоралкан (дихлорметан либо хлороформ). Затем раствор нагревается до температуры прохождения реакции (75 либо 90°C). При этой температуре вводилась смесь триоктилфосфина, диметилформамида и тиоацетамида, в качестве источника серы. Реакционная смесь выдерживалась при этой температуре 30 мин в случае дихлорметана и 7 мин для хлороформа, после чего медленно охлаждалась до комнатной температуры. Реакционная смесь была дважды перерастворена в двойном объеме толуола и центрифугирована при 6000 оборотов 10 мин.

**Оптические свойства.** Экспериментальным путем было определено, что при температурах реакции 71–90°C образуются нанокристаллы с одинаковым характером оптических откликов. Их двумерная структура была подтверждена средствами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), которая показала плоские тонкие листы шириной 200–400 нм. Рис. 1 содержит изображение нанопластины, где видно наложение двух плоских листов 400×150 нм друг на друга. Для дополнительного

подтверждения двумерной морфологии нанокристаллов PbS и точной оценки их оптических параметров была проведена характеристизация их электронной энергетической структуры методами абсорбционной и люминесцентной спектроскопии. Типичные спектры приведены на рис. 1.

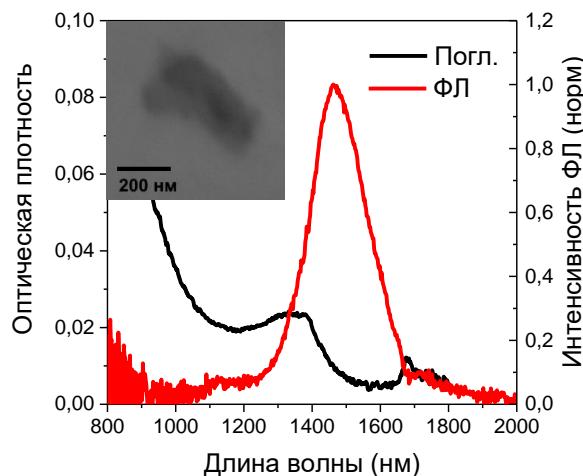


Рис. 1. Спектры поглощения и фолотюминесценции нанопластиин PbS1 в четыреххлористом углероде. Вставка: СЭМ-изображение нанопластиин

Как видно из графика, четко выраженный край полосы поглощения на 1510 нм с максимумом на 1383 нм перекрывается с полосой фотолюминесценции (ФЛ). Полоса ФЛ нанопластиин характеризуется максимумом на 1462 нм и полушириной 190 нм. Подробные значения параметров для двух синтезов отражены в таблице. Образцы отличаются температурой реакции – в первом случае 90, во втором 75°C. Образец, полученный при более низкой температуре характеризуют меньшая ширина полосы ФЛ и больший стоксов сдвиг, что позволяет предположить, что использованные условия реакции являлись более предпочтительными для получения таких нанопластиин.

Таблица. Спектральные характеристики нанопластиин PbS в четыреххлористом углероде

№ образца	Спектральные характеристики нанопластиин PbS, нм				
	Пик поглощения	Край поглощения	Пик ФЛ	FWHM	Стоксов сдвиг
PbS1	1383	1510	1462	190	79
PbS2	1380	1520	1482	160	102

Полученные результаты полностью соответствуют литературным данным для данного класса нанообъектов и определяют полученные нанокристаллы как нанопластины толщиной приблизительно 1,2 нм [5]. Они демонстрируют ряд принципиальных отличий от нанопластиин соединений кадмия, в силу различия энергетических структур нанокристаллов, имеющих решетку цинковой обманки в случае кадмия и кубическую решетку типа NaCl в случае свинца. Спектр поглощения демонстрирует четко различимую ступень, а не узкие экситонные максимумы, как нанопластины соединений кадмия. Это можно частично объяснить дисперсией толщины нанопластиин в образце, а также большим значением диэлектрической постоянной PbS. В нанопластинах PbS наблюдается гашение вклада кулоновского взаимодействия, справедливое так же и для наностержней PbS [6].

На рис. 2 приведена кривая затухания ФЛ в области максимума излучения, аппроксимированная трех-экспоненциальной зависимостью.

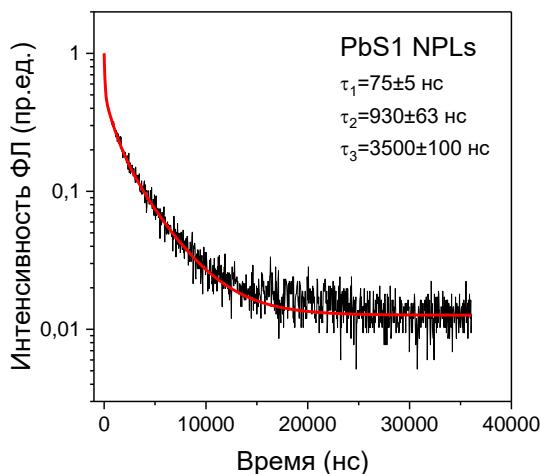


Рис. 2. Кривые затухания ФЛ нанопластин PbS1 в четыреххлористом углероде

Средневзвешенные времена затухания ФЛ нанопластин PbS составили 2900 нс. Согласно литературным данным [7] квантовые точки PbS с полосой фотолюминесценции в той же области (0,82 эВ) имеют времена затухания фотолюминесценции около 750 нс.

**Деградация нанопластин.** Нанопластины PbS представляют определенную сложность в поддержании их стабильности. Без специального вмешательства стоковый раствор деградирует с переходом нанопластин в квантовые точки. Причина такого поведения лежит в принципиальных механизмах роста двумерных нанокристаллов. Нанопластины халькогенидов кадмия образуются в ходе роста кристалла благодаря продолжающейся реакции прекурсоров [8]. В противоположность этому в случае халькогенидов свинца, рост нанопластин происходит путем направленного присоединения зерен либо более мелких островков, образованных зернами нанокристаллов [2] с последующей перестройкой атомов поверхности. Этот процесс легко обратим, поэтому для ранних образцов мы наблюдали распад нанопластин в более мелкие скопления и отдельные нанокристаллы. Этот процесс проиллюстрирован на изображениях с электронного микроскопа (Merlin, Carl Zeiss) на рис. 3.

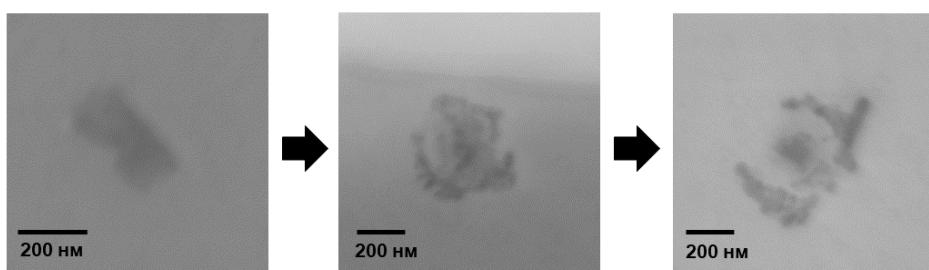


Рис. 3. Изображения нанопластин в образце PbS2, полученные с помощью электронного микроскопа, которые отражают различные стадии деградации нанопластин

Такое кардинальное изменение морфологии нанокристалла приводит к изменению условий квантового конфайнмента и, следовательно, оптических откликов. На графиках рис. 4 показаны спектры нанопластин в 1 день жизни и снятые через 7 дней. Решением проблемы является подбор правильной среды хранения. При переводе нанопластин в четыреххлористый углерод положение полосы ФЛ сохраняется, как видно из рис. 4, в. Вклад в сигнал ФЛ от квантовых точек, свидетельствующий об их количестве, вырос, но в малых масштабах.

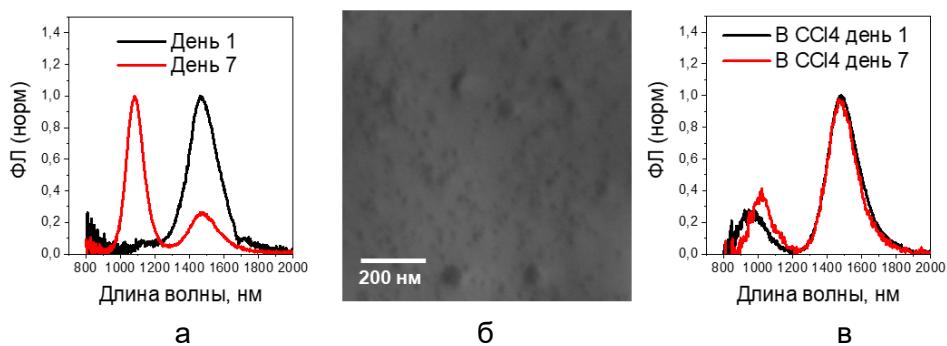


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции стокового раствора нанопластина PbS1 на первый день после синтеза и через неделю (а); изображениеnanoструктур в стоковом растворе образца PbS1 после 7 дней хранения (б); спектры образца нанопластина PbS, которые были переведены в четыреххлористый углерод на момент перевода и через 7 дней после него (в)

**Заключение.** В работе проведено исследование двумерных нанокристаллов сульфида свинца. Методами органического синтеза получены образцы нанопластины коллоидном растворе. Их оптические свойства исследованы с применением техник абсорбционной и люминесцентной спектроскопии. Проведено исследование динамики деградации морфологии nanoструктур в образце средствами электронной микроскопии и изменение их оптических откликов.

Используя полученные в результате работы сведения, можно получить качественные nanoструктуры с управляемыми оптическими свойствами в ближнем ИК диапазоне, обладающие стабильностью в коллоидном растворе и представляющие несомненную привлекательность. Получение материалов ИК диапазона со значениями времен затухания фотолюминесценции более, чем в два раза, превышающего общедоступные, идеально удовлетворяет нуждам современной фотовольтаики, что делает нанопластины сульфида свинца прекрасным кандидатом для этой области.

### Литература

1. Ithurria S. et al. Colloidal nanoplatelets with two-dimensional electronic structure // Nat. Mater. – 2011. – V. 10. – № 12. – P. 936–941.
2. Schliehe C. et al. Ultrathin PbS Sheets by Two-Dimensional Oriented Attachment // Science. – 2010. – V. 329. – № 5991. – P. 550–553.
3. Zhang H. et al. Colloidal Synthesis of PbS and PbS/CdS Nanosheets Using Acetate-Free Precursors // Chem. Mater., 2016. – V. 28. – № 1. – P. 127–134.
4. Lhuillier E., Guyot-Sionnest C. Recent Progresses in Mid Infrared Nanocrystal Optoelectronics // IEEE J. Sel. ToC. Quantum Electron. – 2017. – V. 23. – № 5. – P. 1–8.
5. Bhandari G.B. et al. Thickness-Controlled Synthesis of Colloidal PbS Nanosheets and Their Thickness-Dependent Energy Gaps // Chem. Mater. – 2014. – V. 26. – № 19. – P. 5433–5436.
6. Bartnik A.C. et al. Electronic states and optical properties of PbSe nanorods and nanowires // Phys. Rev. B. American Physical Society. – 2010. – V. 82. – № 19. – P. 195313.
7. Ushakova E.V. et al. Anomalous Size-Dependent Decay of Low-Energy Luminescence from PbS Quantum Dots in Colloidal Solution // ACS Nano. – 2012. – V. 6. – № 10. – P. 8913–8921.
8. Ithurria S., Bousquet G., Dubertret B. Continuous transition from 3D to 1D confinement observed during the formation of CdSe nanoplatelets // J. Am. Chem. Soc. – 2011. – V. 133. – № 9. – P. 3070–3077.

УДК 535.321

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Кривцова Р.С.<sup>1</sup>, Точилина Т.В.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н. Точилина Т.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены основные методы измерения показателей преломления. Проведен анализ основных параметров средств измерения показателя преломления. Рассмотрены принципиальные схемы методов измерения показателя преломления.

**Ключевые слова:** показатель преломления, погрешность, измерения, гониометр, рефрактометр, интерференция.

**Введение.** Показатель преломления является важной характеристикой оптической среды, которая зависит от длины волны излучения и свойств вещества, таких как: состав, плотность, структура. Показатель преломления используется для определения физико-химических свойств материала, идентификации веществ и структурного анализа. В настоящее время основными методами измерения можно назвать: гониометрические, рефрактометрические и интерференционные. Однако ни один из этих методов нельзя назвать универсальным, который позволит измерять одновременно как призмы, так и жидкости, работать во всем спектральном диапазоне, иметь универсальные условия эксплуатации. Выбор метода зависит от погрешности измерений, принципа работы, рациональности исполнения всех требований, предписанных для каждого метода, при изготовлении образца для измерений.

Целью данной работы является обзор методов и средств измерения показателя преломления, а также анализ погрешностей метода, принципа работы, принципиальных схем.

**Методы измерения показателя преломления.** Гониометрический метод заключается в измерении углов отклонения, образующихся при прохождении луча через образец, изготовленный в виде призмы. Включает в себя метод автоколлимации и метод наименьшего отклонения (рис. 1).

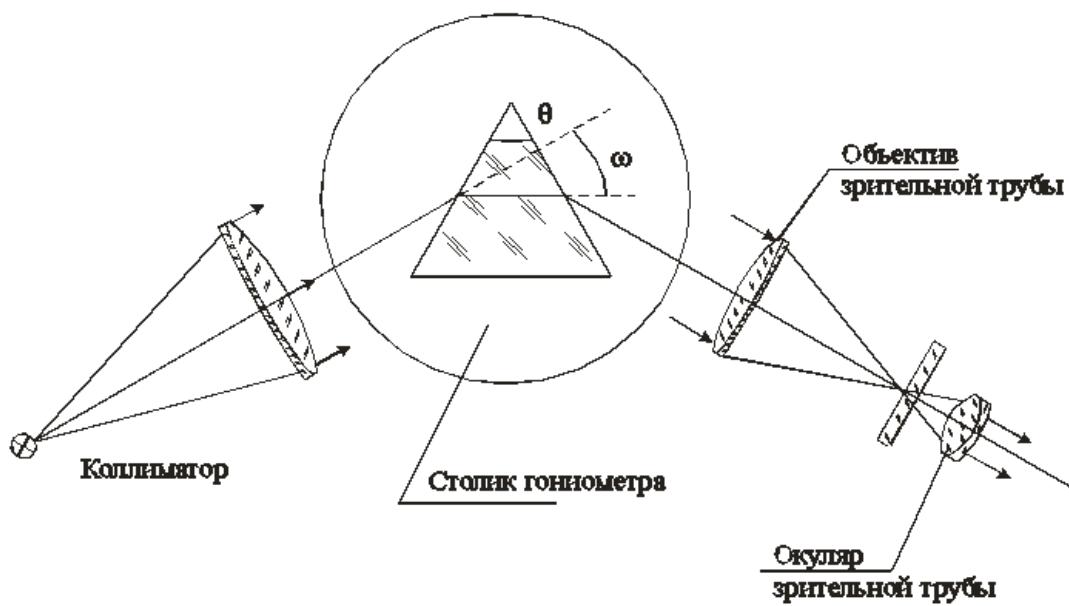


Рис. 1. Схема определения показателя преломления методом наименьшего отклонения на гониометре

Рефрактометрический метод основан на определении угла выходящего луча, вдоль плоскости, которая разделяет две среды, одна из которых исследуемое вещество. Основными являются методы Аббе (рис. 2) и Пульфриха [1].

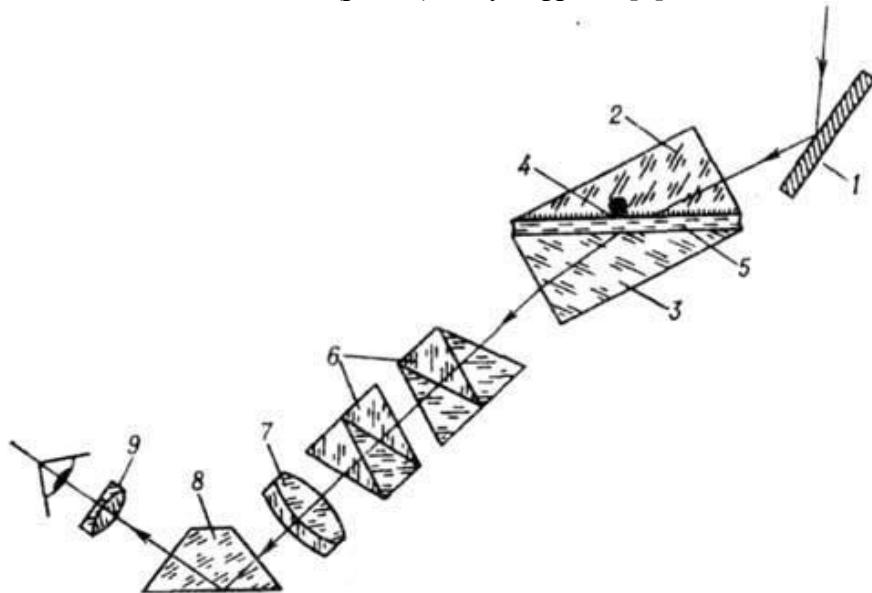


Рис. 2. Схема рефрактометра типа Аббе ИРФ-22: 1 – зеркало; 2 – призма откидная вспомогательная; 3 – основная призма; 4 – матированная грань призмы откидной; 5 – исследуемая жидкость; 6 – призмы Амичи; 7 – объектив; 8 – поворотная призма; 9 – окуляр

Интерференционный метод заключается в наблюдении за интерференционной картиной, возникающей в результате разделения когерентного пучка света через полупрозрачную пластинку. В случае если происходит фазовый сдвиг, можно сделать вывод, что произошли изменения в длине оптического пути или показателе преломления. Основными используемыми схемами являются интерферометры Рэлея, Майкельсона (рис. 3), Фабри–Перо, Маха–Цендера [1].

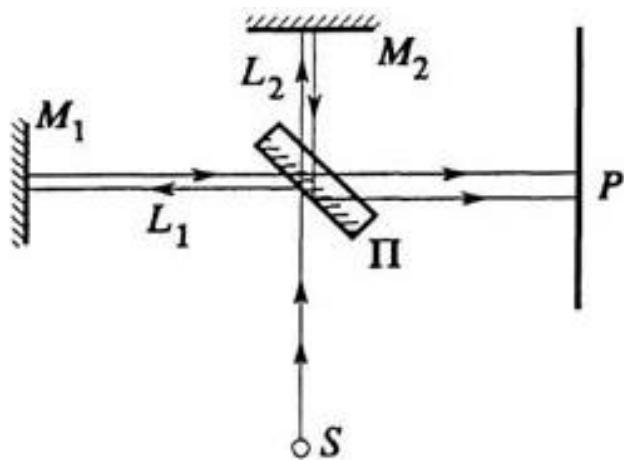


Рис. 3. Схема интерферометра Майкельсона

**Применение методов измерения показателя преломления.** Гониометрический метод применим только к твердым веществам. Также образцы должны быть изготовлены в виде призмы, с высоким качеством поверхностей, что сильно ограничивает использование данного метода.

Рефрактометрический метод дает возможность измерения как твердых, так и жидких (прозрачных и непрозрачных) веществ. Однако данный метод используется

только в видимых областях спектра и ограничивается разностями показателей преломления.

Интерференционный метод используют для твердых, жидких тел. Измеряемый образец может иметь любую форму, но на расстоянии более 2 мм от рабочей грани не должно быть включений, свилей, пузырей видимых невооруженным глазом. Так же как и рефрактометрический метод, может работать только в видимом диапазоне и имеет ограничение по разности показателя преломления [2].

**Приборы для измерения показателей преломления.** В современном мире существует множество электронных приборов, которые упрощают процесс измерения показателей преломления. Они отличаются точностью и диапазоном измерения, методом, функциональностью.

Сравнительный анализ некоторых современных приборов представлен в табл. 1. Точность измерения некоторых рефрактометров в таблице представлена в % шкалой Брикса.

Таблица 1. Приборы для измерения показателя преломления [3]

Метод измерения	Наименование прибора	Точность измерения	Диапазон измерения	Особенности
Рефрактометрический	30PX	±0,0005nD	1,32–1,50nD	Используется для жидкостей. Портативный
	Index Cell RX5	0,014%	1,32–1,70nD	Используется для жидкостей. Проводит измерения плотности. Поддерживает требуемую температуру.
	Easy R40	±0,0001nD	1,30–1,72nD	Используется для жидкостей. Анализ начинается сразу после контакта с образцом. Поддерживает требуемую температуру
	ИРФ-454Б2М	±0,0001nD	1,20–1,70nD	Используется для жидкостей и твердых тел
	Nar-1T	±0,0002nD	1,30–1,70nD	Используется для жидкостей и твердых тел. Измерения проводятся без применения натриевой лампы
Гониометрический	Gonio II-VIS	±0,00001nD	436–650 нм	Используется для твердых тел. Обладает высокой точностью. Цифровой.
Интерференционный	ИСА-1	±0,001nD	1,39–1,65nD	Используется для твердых и жидких тел. Результаты измерения представляются в виде графиков.
	OV-SPI500 3D	±0,0001nD	400–800 нм	Используется для твердых тел. Измерение и получение результатов в режиме реального времени.

**Нормирующие документы методов измерения показателей преломления. Погрешности по ГОСТ.** Для измерения показателя преломления практически любого материала существует огромное разнообразие стандартов. Наиболее используемым на

практике и основополагающим ГОСТом в данном направлении является ГОСТ 28869-90 «Материалы оптические. Методы измерения показателя преломления». Кроме этого существуют следующие ГОСТы, которые также регулируют измерение показателя преломления: ГОСТ 18995.2-73 «Продукты химические жидкие. Метод определения показателя преломления», ГОСТ 5482-90 «Масла растительные. Метод определения показателя преломления (рефракции)», ГОСТ 5421-56 «Стекло оптическое. Методы испытаний. Измерение показателя преломления методом Обреимова» и др. В перечисленных ГОСТах нормируются погрешности показателей преломления, рабочий диапазон и другие.

В ГОСТ 5482-90 представлена таблица выбора метода измерения показателя преломления. Значения погрешностей в зависимости от метода из ГОСТа приведены в табл. 2.

Таблица 2. Погрешности измерений по ГОСТ 5482-90 [2]

Метод измерения	Наименование прибора	Предельная погрешность измерения	
		Показателя преломления	Средней дисперсии
Наименьшего отклонения	Гониометр, гониометр спектрометр	$\pm 1 \cdot 10^{-5}$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$
Автоколлимации	Гониометр, гониометр спектрометр	$\pm 1 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1,5 \cdot 10^{-6}$
	Автоматизированный гониометр-спектрометр	$\pm 6 \cdot 10^{-6}$	$\pm 3 \cdot 10^{-6}$
Рефрактометрический	Рефрактометр Пульфриха	$\pm 1 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$
	Рефрактометр Аббе	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$
	V-рефрактометр	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$
	Компенсационный рефрактометр	$\pm 1 \cdot 10^{-5}$	—
Интерференционный сравнительный метод Обреимова	Монохроматор	$\pm 1 \cdot 10^{-4}$	—

**Заключение.** В исследовании рассмотрены основные методы измерения показателя преломления такие как: гониометрические, интерференционные, рефрактометрические. Описаны принципы работы, приборы, а также погрешности методов измерения показателей преломления.

В дальнейшем планируется произвести более глубокий анализ рефрактометрических методов измерения показателей преломления, так как на данный момент он является наиболее широко используемым.

## Литература

1. Методы, применяемы для измерения показателя преломления [Электронный ресурс]. – Режим доступ: <http://crystalt.org/production/instruction/1424158495-Metodi-primenyaemie-dlya-izmereniya-pokazatelya-prelomleniya.html>, своб.
2. ГОСТ 28869-90. Материалы оптические. Методы измерения показателя преломления. – Введен 01.01.1992. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 29 с.
3. METTLERTOLEDO [Электронный ресурс]. – Режим доступ: [https://www.mt.com/ru/ru/home/products/Laboratory\\_Analytics\\_Browse/refractometer/refractometers/R4.html](https://www.mt.com/ru/ru/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/refractometer/refractometers/R4.html), своб.

УДК 535.421, 535.417

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ГОЛОГРАММ НА ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ

Крыкова В.А.<sup>1</sup>, Иванов С.А.<sup>1</sup>, Никоноров Н.В.<sup>1</sup>, Пичугин И.С.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Никоноров Н.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В данной работе определялся оптимальный режим записи голограмм на фото-термо-рефрактивном стекле, при котором достигается наибольший вклад изменения показателя преломления стекла в первый порядок дифракции. В результате исследования было показано, что профиль показателя преломления голограмм на ФТР стекле имеет несинусоидальный характер, также были построены зависимости доли первой и высших порядков дифракции в общем изменении показателя преломления объемной брэгговской решетки.

**Ключевые слова:** фото-термо-рефрактивное стекло, голограмма, процесс фото-термо-индуцированной кристаллизации, объемная брэгговская решетка, профиль показателя преломления, порядок дифракции, гармоника показателя преломления, угловая селективность.

**Введение.** Фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло – особый класс светочувствительных силикатных стекол, которые были разработаны для записи высокоеффективных объемных голограмм и оптических элементов на их основе.

В состав ФТР стекла помимо стеклообразователя  $\text{SiO}_2$  и модификаторов  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{ZnO}$  и  $\text{NaBr}$  входят фоточувствительные добавки  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Ag}_2\text{O}$  и  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ . Изменение показателя преломления ФТР стекла происходит за счет процесса фото-термо-индуцированной (ФТИ) кристаллизации, в результате которого в стекле происходит локальное уменьшение показателя преломления в облученной области, из-за роста нанокристаллов  $\text{NaF}$  [1]. Механизм данного процесса представлен на рис. 1.

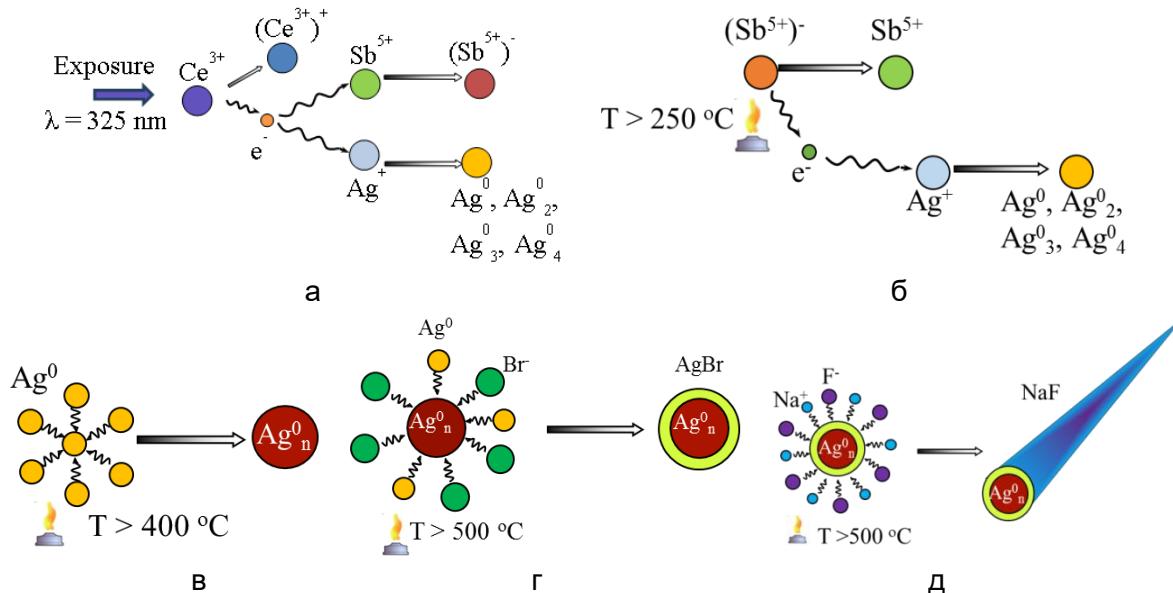


Рис. 1. Процесс ФТИ кристаллизации [1]

ФТР стекло является перспективным материалом для создания дифракционных оптических элементов благодаря таким преимуществам как высокая химическая, термическая и лучевая стойкости, сравнимые со стеклом K8, а также неограниченному сроку хранения, составляющему десятки лет. Голограммы, записанные на ФТР стекле, являются чисто фазовыми, имеют дифракционную эффективность вплоть до 99,9% и прозрачны во всем видимом спектральном диапазоне до ближней ИК области. Более того, изменение показателя преломления стекла в результате процесса ФТИ

кристаллизации достигает  $3 \cdot 10^{-3}$ , что позволяет получать высокоселективные брэгговские решетки даже при малой толщине стекла.

В большинстве случаев в дифракционных оптических элементах используется только первый порядок дифракции голограммы, однако решетки на ФТР стекле имеют большее количество порядков. Поэтому для создания высокоэффективных элементов при записи большого количества голограмм или при записи на малой толщине материала крайне важно использовать все изменение показателя преломления. Таким образом, важно определить оптимальные режимы записи брэгговских решеток, при которых достигается наибольший вклад изменения показателя преломления стекла в первый порядок дифракции.

Целью данной работы является определение оптимального режима записи объемных брэгговских решеток, при которых достигается наибольший вклад изменения показателя преломления стекла в первый порядок дифракции.

Для построения зависимости доли первой и высших гармоник в общем изменении показателя преломления объемной брэгговской решетки необходимо определить профиль показателя преломления голограмм. Так как показатель преломления решеток представляет собой гармоническую функцию, ее можно разложить на ряд Фурье в виде:

$$n(x) = \bar{n} + \sum_{k=1}^{\infty} n_k \cos\left(\frac{2\pi k x}{d}\right), \quad (1)$$

где  $x$  – координата;  $n_0$  – исходный показатель преломления стекла;  $\bar{n}$  – средний показатель преломления стекла с голограммой;  $d$  – период голограммы;  $k$  – порядок дифракции;  $n_k$  – амплитуда модуляции показателя преломления  $k$ -го порядка дифракции.

**Эксперимент.** Для исследования была проведена запись объемных брэгговских решеток с большим периодом (5,4 мкм) по схеме, представленной на рис. 2, в диапазоне экспозиций – от 0,5 до 16 Дж/см<sup>2</sup>. Выбранный период голограмм позволял наблюдать 5 порядков дифракции в видимом свете, что является достаточным для построения профиля показателя преломления голограммы. Экспозиции выбраны таким образом, чтобы сравнить профили голограмм, записанные при оптимальной дозе облучения, когда достигается максимальное изменение показателя преломления материала, и при отличных от них, когда максимальное изменение еще не достигнуто и когда контраст интерференционной картины падает. Для определения профиля показателя преломления производились измерения угловых зависимостей для 5 порядков дифракции голограмм на длине волны 632,8 нм и определялась амплитуда модуляции каждой гармоники.

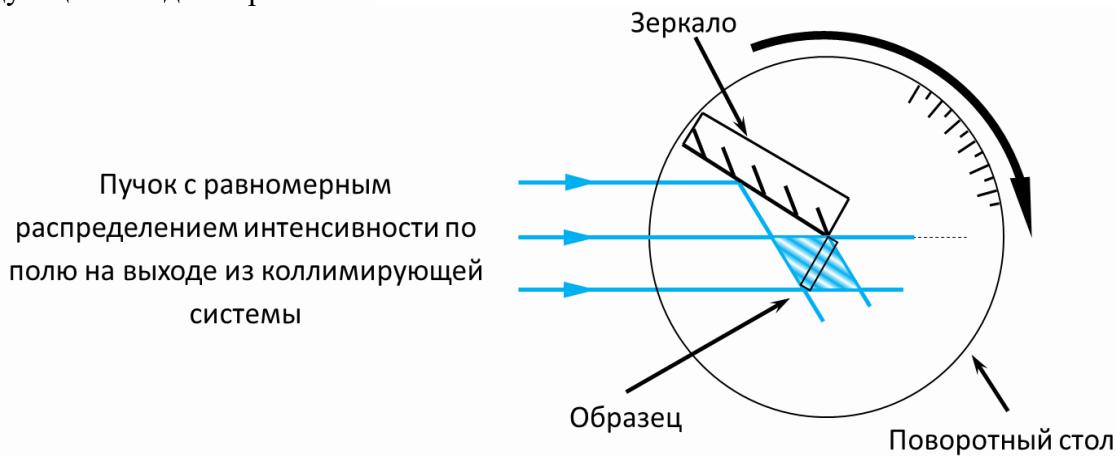


Рис. 2. Схема записи голограмм

**Результаты.** На рис. 3 приведен пример контуров угловой селективности с первого по 5-ый порядки дифракции голограммы с оптимальной дозой облучения, при которой достигается наибольшее изменение показателя преломления стекла. С увеличением порядка дифракции наблюдается сильное снижение дифракционной эффективности решетки.

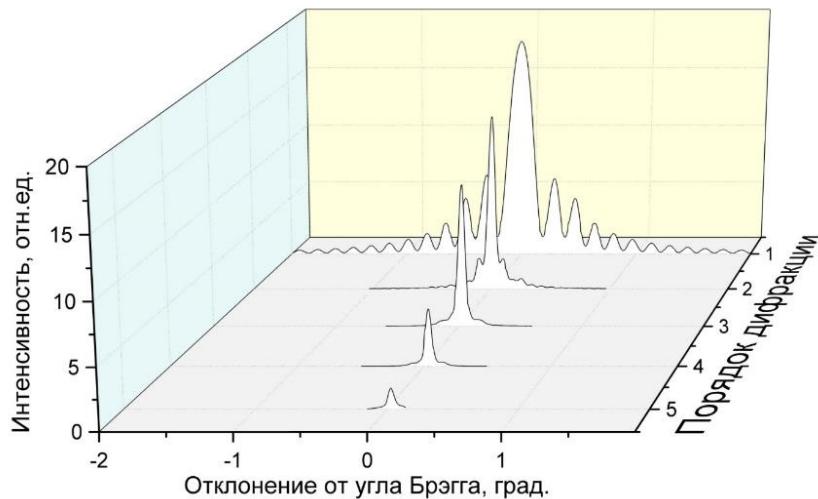


Рис. 3. Контура угловой селективности брэгговской решетки с дозой облучения  $1 \text{ Дж/см}^2$

По полученным значением амплитуд модуляции всех наблюдаемых гармоник показателя преломления голограмм были построены профили показателя преломления ФТР стекла (рис. 4). Видно, что экспериментальный профиль отличен от синусоидального.

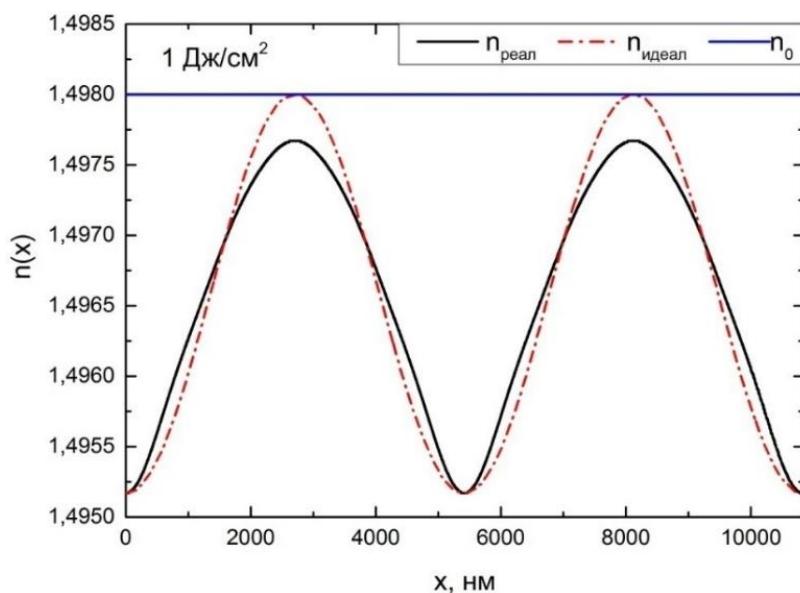


Рис. 4. Профиль показателя преломления ФТР стекла. Синяя кривая соответствует показателю преломления исходного стекла, красная – синусоидальному профилю и черная – реальному

На рис. 5 представлена зависимость доли первой гармоники в общем изменении показателя преломления решетки. При увеличении экспозиции стекла вклад этой величины резко снижается и достигнув значения 0,62 при экспозиции  $4 \text{ Дж/см}^2$  выходит на насыщение.

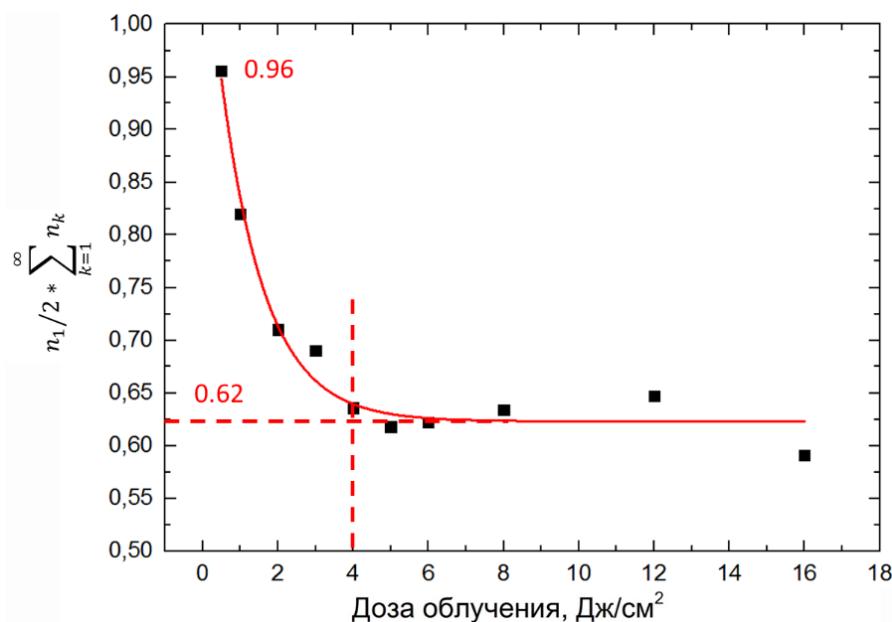


Рис. 5. Доля первой гармоники в общем изменении показателя преломления решетки

**Заключение.** В результате исследования было показано, что профиль показателя преломления голограмм на ФТР стекле имеет несинусоидальный характер, что при увеличении дозы облучения наблюдается снижение вклада 1-ого порядка дифракции в изменение показателя преломления. Также были построены зависимости доли первой и высших гармоник в общем изменении показателя преломления решетки, установлено, что при достижении дозы облучения 4 Дж/см<sup>2</sup> построенные зависимости выходят на насыщение. Такой характер зависимости может быть обусловлен тем, что в процессе записи голограмм завершается процесс формирования молекулярных кластеров серебра уже при накоплении дозы 4 Дж/см<sup>2</sup>.

### Литература

1. Иванов С.А., Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Асеев В.А. Голографические характеристики модифицированного фото термо рефрактивного стекла // Оптический журнал. – 2014. – Т. 81. – № 6. – С. 72–77.

УДК 535.64, 549.091

ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦВЕТНЫХ КАМНЕЙКушкоева А.С.<sup>1</sup>, Горбунова Е.В.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н., доцент Чертов А.Н.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены задачи метрологического обеспечения оборудования для оценки качества цветных камней. На основании количественных значений показателей качества, таких как цвет, чистота и размер, осуществляется комплексная оценка качества образцов цветных камней. Стоимость формируется на основании соотношения результатов оценки и существующего прейскуранта на тот или иной образец. Влияние качества на стоимость, определяет необходимость подтверждения и стандартизации полученных результатов измерения.

**Ключевые слова:** техническое зрение, цветные камни, качество, цвет, чистота, размер, коррекция.

**Введение.** В настоящее время существует запрос на максимальную автоматизацию и цифровизацию производственно-технологических процессов. Одной из перспективных областей является оценка качества цветных камней, которая сейчас осуществляется, главным образом, визуальным методом [1–4].

Предлагается рассмотреть автоматизированную систему технического зрения, одновременно определяющую все ключевые показатели качества цветных камней. Экспериментальная установка представлена на рис. 1.

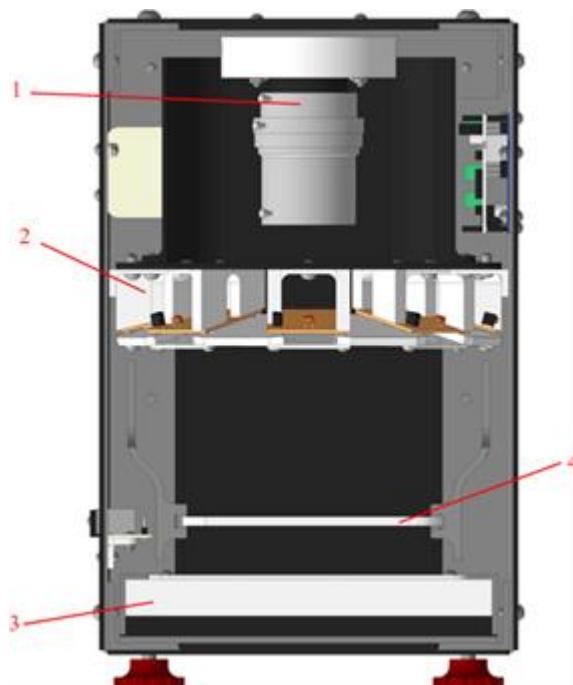


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – узел регистрации; 2 – модуль верхней подсветки; 3 – модуль нижней подсветки; 4 – сменная кассета для размещения анализируемых образцов

С помощью экспериментальной установки получают изображения образцов цветных камней, освещенных равномерным световым потоком. Для получения максимального контраста изображения, получаемого с помощью видеокамеры, и исключения влияния бликов используется комбинированная подсветка. Изображения, формируемые видеокамерой, передаются в персональный компьютер, где обрабатываются при помощи разработанных алгоритмов определения показателей качества.

**Теоретические подходы.** В результате экспериментальных исследований была поставлена задача обеспечения единства и точности полученных результатов измерения, с помощью алгоритмов предобработки и коррекции изображений, представленных в виде блок-схемы (рис. 2).

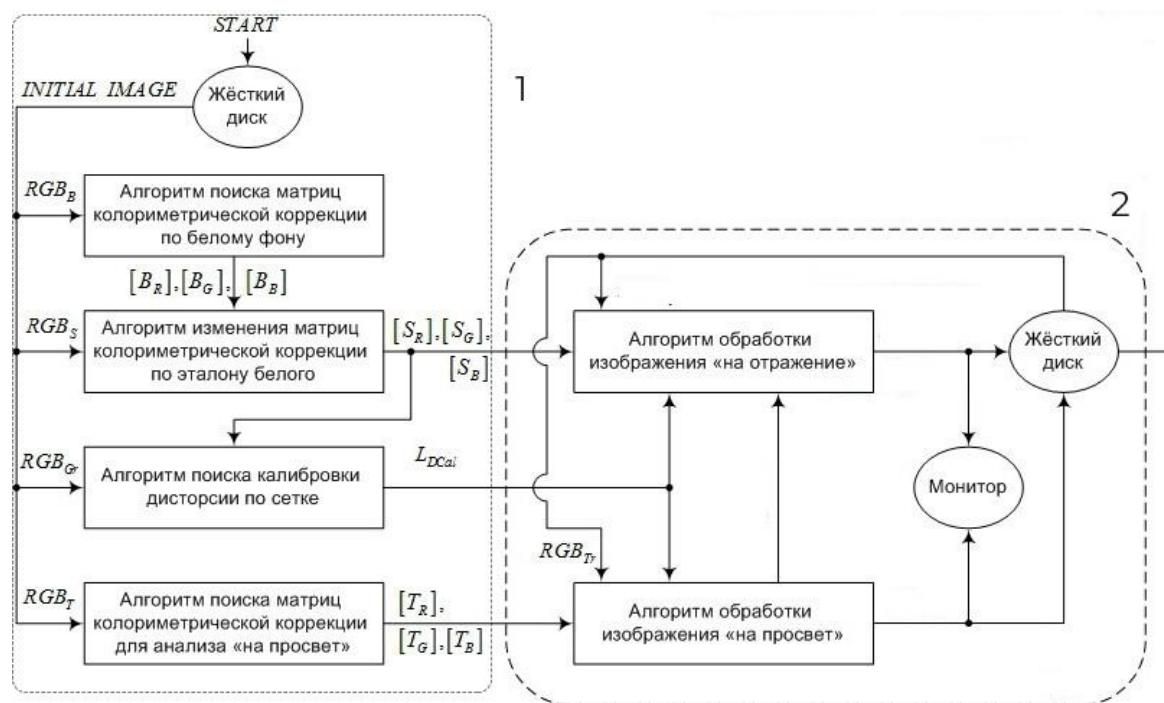


Рис. 2. Схема обработки исходных изображений: 1 – блок предобработки и коррекции изображения; 2 – блок обработки изображения; *Start* – команда на запуск; *initial image* – усредненное изображение, свободное от ошибок захвата, выраженных в смещении данных по одному или более каналам по изображению в горизонтальном направлении.

$RGB_B$  – цветное изображение белого или светло-серого фона, используемое для колориметрической калибровки узла регистрации при анализе «на отражение»;

$RGB_S$  – цветное изображение колориметрического эталона белого, используемое для колориметрической калибровки узла регистрации при анализе «на отражение»;

$RGB_T$  – цветное изображение рассеивателя нижней подсветки, используемое для колориметрической калибровки узла регистрации при анализе «на просвет»;

$RGB_{Gr}$  – цветное изображение калибровочной сетки, используемое для метрической калибровки узла регистрации;  $RGB_{Tr}$  – цветное изображение образца в режиме «на пропускание»;  $RGB_{Rf}$  – цветное изображение образца в режиме «на отражение»;

$[B_R], [B_G], [B_B]$  – матрицы колориметрической коррекции изображений образцов по белому фону;  $[S_R], [S_G], [S_B]$  – итоговые матрицы колориметрической коррекции изображений образцов;  $[T_R], [T_G], [T_B]$  – матрицы колориметрической коррекции по рассеивателю источника нижней подсветки;  $L_{DCal}$  – канал светлоты после определения и коррекции искажений оптики

При использовании системы технического зрения в оборудовании для оценки цветовых параметров образцов цветных камней необходимо проводить ряд периодических цветовых коррекций, необходимых для обеспечения достоверности результатов измерений.

Временной интервал периодичности цветовых коррекций зависит от стабильности работы используемых устройств освещения зоны анализа и регистрации изображения (матрица МПОИ).

При оценке показателей качества цветных камней рекомендуется проводить периодические коррекции, которые приводят цветовое тело воспроизведения

используемой системы технического зрения максимально близко к цветовому телу воспроизведения оттенков зрительного аппарата человека в заданном диапазоне цветов.

Заданный диапазон цветов определяется с использованием цветовых эталонов, например, таких как, Color Mansell Color Check или меры-имитаторы цветных камней GemSet. Данная коррекция проводиться с периодичностью – 1 раз в год, в силу стабильности большинства типов источников подсветки.

Следующие типы коррекции необходимо проводить перед каждой серией измерения.

Для коррекции недостатков и влияния полевых аберраций оптической системы рекомендуется использовать равномерный белый фон, позволяющий определять и компенсировать перепады освещенности в зоне анализа.

Также для реализации достоверного определения цвета по всей зоне анализа необходимо проводить колориметрическую коррекцию по эталону белого (например, эталона диффузного отражения WS-1 производства Ocean Optics, обеспечивающего настройку баланса белого – ахроматических цветов – и реализующего стандартные условия колориметрических наблюдений в соответствии с требованиями расчета цветовых характеристик МКО). При этом должны учитываться спектральные характеристики излучения источников подсветки и спектральных характеристик чувствительности каналов цветности системы технического зрения. Таким образом, формируются итоговые матрицы колориметрической коррекции, измененные в соответствии с коррекцией баланса между каналами цвета изображения поверхности колориметрического эталона белого и колориметрическими координатами указанного эталона.

Для реализации возможности определения размерных параметров образцов цветных камней следует проводить коррекцию искажений оптической системы по изображению равномерной сетки, размещаемой в зоне анализа.

**Экспериментальные исследования.** Использование вышеописанных коррекций позволяет в работе системы технического зрения добиться стабильности и достоверности результатов измерений, что подтверждается экспериментальными исследованиями (табл. 1–3).

Таблица 1. Размерные параметры образцов различных крупностей при различных ориентациях образцов

Ориентация образца в зоне анализа	Крупность				
	2–5 мм	5–10 мм	10–15 мм	15–20 мм	+20 мм
	Измеряемый максимальный размер образца, мм				
горизонтальная	4,938770	10,650872	13,227696	19,396303	30,187598
угол до 90°	5,018003	10,709397	13,402858	19,572586	30,100629
вертикальная	5,057355	10,712985	13,291008	19,441408	30,157026
угол от 90° до 180°	5,115814	10,633004	13,285071	19,519910	29,964977
Длина оптимального прямоугольника, мм					
горизонтальная	4,342509	9,179516	11,590244	18,069999	3,308659
угол до 90°	4,516006	9,286435	11,772362	18,235785	23,146582
вертикальная	4,608025	9,178202	11,592997	18,165484	23,094116
угол от 90° до 180°	4,637486	9,032012	11,652811	18,306521	23,079079
Ширина оптимального прямоугольника, мм					
горизонтальная	4,032330	7,859174	8,881654	14,910908	22,737057
угол до 90°	4,134372	7,887109	9,099717	14,931740	22,575845
вертикальная	4,047589	7,920914	8,883764	14,759456	22,712395
угол от 90° до 180°	4,129268	8,205138	8,992930	14,862088	22,318230

Таблица 2. Цвет и цветовые параметры образцов различных цветовых классов при различных ориентациях образцов

Ориентация образца в зоне анализа	Цветовой класс					
	Белый	Св. зел.	Зеленый	Т. зел.	Светлый	Прочее
	Цветовой тон					
вертикальная	48	124	135	127	48	52
угол до 90°	47	126	133	124	49	52
горизонтальная	45	126	133	124	49	53
угол от 90° до 180°	44	126	134	124	49	52
	Светлота					
вертикальная	80	59	32	14	64	36
угол до 90°	76	59	32	14	64	36
горизонтальная	76	60	28	14	64	35
угол от 90° до 180°	76	58	32	14	64	35
	Насыщенность					
вертикальная	13	16	19	16	28	27
угол до 90°	12	16	20	24	28	27
горизонтальная	12	16	19	19	29	27
угол от 90° до 180°	13	16	19	18	29	29
	Цветовой класс					
вертикальная	0 (белый)	1 (св.-зел.)	2 (зеленый)	3 (т.-зел.)	4 (светлый)	5 (прочее)
угол до 90°	0 (белый)	1 (св.-зел.)	2 (зеленый)	3 (т.-зел.)	4 (светлый)	5 (прочее)
горизонтальная	0 (белый)	1 (св.-зел.)	2 (зеленый)	3 (т.-зел.)	4 (светлый)	5 (прочее)
угол от 90° до 180°	0 (белый)	1 (св.-зел.)	2 (зеленый)	3 (т.-зел.)	4 (светлый)	5 (прочее)

Таблица 3. Определение чистоты образцов с различными свойствами пропускания при различных ориентациях образцов

Ориентация образца в зоне анализа	Образец							
	об. №1	об. №2	об. №3	об. №4	об. №5	об. №6	об. №7	об. №8
	Измеряемый коэффициент пропускания, %							
вертикальная	81	34	7	28	8	10	8	4
угол до 90°	80	31	7	28	8	10	8	4
горизонтальная	81	31	7	29	8	10	8	4
угол от 90° до 180°	81	34	7	28	8	11	8	4
	Определяемый класс прозрачности							
вертикальная	80	32,5	5	27,5	7,5	10	7,5	2,5
угол до 90°	80	30	5	27,5	7,5	10	7,5	2,5
горизонтальная	80	30	5	27,5	7,5	10	7,5	2,5
угол от 90° до 180°	80	32,5	5	27,5	7,5	10	7,5	2,5

**Заключение.** Как показали проведенные экспериментальные исследования, предложенные подходы позволяют достоверно определить показатели качества цветных камней в автоматическом режиме. Цвет определяется в количественном виде

на основании использования стандартных колориметрических методик. Определение размера и его взаимосвязь с установленным классом крупности реализуется с помощью метрической калибровки измерительной системы. Определение класса чистоты обеспечивается методом структурного анализа изображений.

Определение количественных значений показателей качества цветных камней позволит формировать объективные прейскуранты цен на цветные камни, тем самым увеличив и прозрачность соответствующего рынка.

### **Литература**

1. Солодова Ю.П., Андреенко Э.Д., Гранадчикова Б.Г. Определитель ювелирных и поделочных камней. Справочник. – М.: Недра, 1985. – 223 с.
2. Юстова Е.Н. Измерение цвета (колориметрия). – Изд-во СПбГУ, 2000. – 397 с.
3. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
4. Wang D. et al. Automated opal grading by imaging and statistical learning // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2016. – V. 46. – № 2. – P. 185–201.

УДК 661.847.22, 546.06

ПРОЗРАЧНЫЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ И БАКТЕРИЦИДНЫЕ ZNO-SNO<sub>2</sub> ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРНО-СОЛЕВЫМ МЕТОДОМЛесных Л.Л.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.хим.н., профессор Евстропьев С.К.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе представлены результаты исследования структуры и свойств прозрачных фотокаталитических покрытий ZnO–SnO<sub>2</sub>, полученных полимерно-солевым методом на поверхности стекол.

**Ключевые слова:** оксид цинка, оксид олова (II), поливинилпирролидон, стекло, наночастицы, фотокатализ, синглетный кислород, бактерицидные свойства.

**Введение.** Фотохимические процессы широко используются в промышленности, медицине и многих других практических приложениях. Фоторазложение различных органических загрязнений, бактерий – это основное применение процессов. Однако, во многих случаях скорость фотохимических процессов мала, что определяет их низкую эффективность. Поэтому интенсификация фотохимических процессов и увеличение их эффективности является актуальной проблемой. Применение фотокаталитических материалов является эффективным методом ускорения фоторазложения органических загрязнений [1–3].

Оксид цинка широко используется в качестве одного из главных компонентов оксидных фотокаталитических композиций и оказывает сильное влияние на их фотокаталитическую активность [3–5].

Структура, оптические и фотокаталитические свойства материалов ZnO–SnO<sub>2</sub> в значительной степени определяются методом их получения. Разработка методики полимерно-солевого синтеза нанопокрытий ZnO–SnO<sub>2</sub> и изучение их оптических и фотокаталитических свойств. Особое внимание в работе уделялось разработке покрытий, обеспечивающих важное для практического применения сочетание их свойств:

1. высокую прозрачность в видимой части спектра;
2. высокую фотокаталитическую активность;
3. способность генерировать химически активный кислород под действием внешнего УФ излучения.

**Материалы и методы.** Пленкообразующие растворы были изготовлены смешением водных растворов нитрата цинка (0,17М) и хлорида олова (II) (0,22М) с раствором низкомолекулярного поливинилпирролидона (PVP) (Mw=10000; BioChimica) в пропаноле-2. Композиционные покрытия «соли металлов-PVP» были получены на поверхности стекол («Menzel-Glasser», N02 1102) путем погружения в пленкообразующие растворы с последующим извлечением и сушкой.

**Результаты.** Рентгенофазовый анализ покрытий показал наличие нанокристаллов ZnO в структуре (рис. 1, а). Наибольшую интенсивность на дифрактограммах имеет пик, соответствующий плоскости (002). Это говорит о том, что в полученных оксидных покрытиях ось с гексагональных кристаллов ZnO является направлением их преимущественного роста.

Сравнение рентгенофазового анализа покрытий ZnO и ZnO–SnO<sub>2</sub> (рис. 1, а) показывает, что относительная интенсивность пика (002) особенно велика в покрытии ZnO без добавок SnO<sub>2</sub>. Введение SnO<sub>2</sub> в состав покрытий ZnO уменьшает относительную интенсивность (002) пика.

Расчеты размеров кристаллов показали, что все полученные покрытия состоят из маленьких наночастиц, и размеры этих частиц уменьшаются при увеличении содержания в покрытиях  $\text{SnO}_2$ .

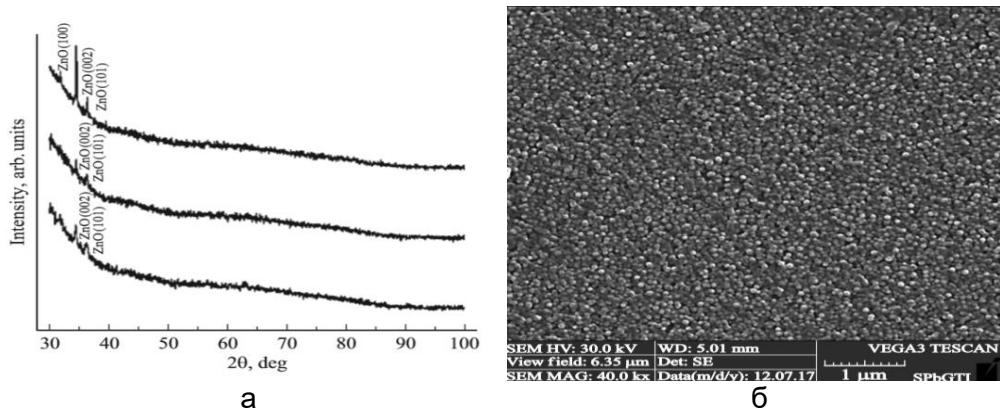


Рис. 1. Данные рентгенофазового анализа покрытий  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnO}-\text{SnO}_2$  с 100; 88,7; 78,9wt.%  $\text{ZnO}$  (а); электронно-микроскопический снимок поверхности тонкого покрытия (88,7wt.%  $\text{ZnO}$ ; 11,3wt.%  $\text{SnO}_2$ ) (б)

На рис. 1, б приведен электронно-микроскопический снимок поверхности покрытия  $\text{ZnO}-\text{SnO}_2$ , изготовленного полимерно-солевым методом.

Покрытие состоит из маленьких (менее 100 нм) тесно упакованных частиц, полностью покрывающих поверхность стекла, частицы характеризуются высокой однородностью по размеру.

Полученные оксидные покрытия демонстрируют высокую прозрачность в ближней УФ и видимой областях спектра. Спектры поглощения образцов стекол с покрытиями  $\text{ZnO}-\text{SnO}_2$  приведены на рис. 2, а (с разными концентрациями  $\text{SnO}_2$ ).

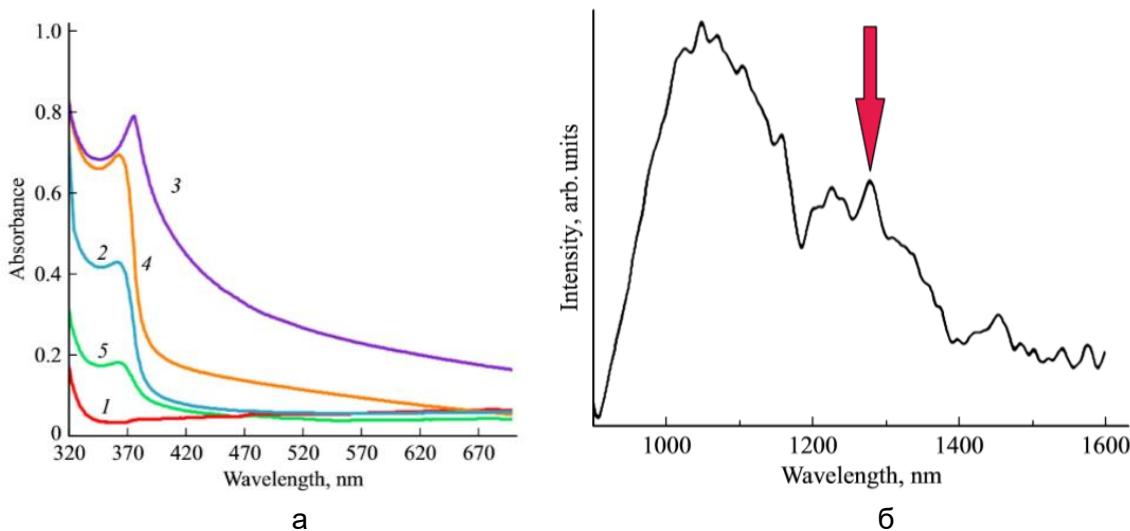


Рис. 2. Спектры поглощения образцов стекол с  $\text{ZnO}-\text{SnO}_2$  (а); спектр фотолюминесценции покрытия состава  $\text{ZnO}$  78,9 wt.% в ближней ИК области спектра при возбуждении на длине волны 370 nm (б)

В спектрах наблюдается экзитонная полоса поглощения с  $\lambda_{\text{max}}=370$  nm, характерная для оксида цинка [4]. Увеличение содержания  $\text{SnO}_2$  в материале покрытия до 11,3 wt.% приводит к существенному росту поглощения в УФ области спектра.

На рис. 2, б наблюдается полоса фотолюминесценции ( $\lambda_{\text{max}}=1270$  nm), характерная для синглетного кислорода. Относительно низкие интенсивности этой полосы определяются малой толщиной покрытий.

Кинетические зависимости разложения красителя CSB представлены на рис. 3, а.

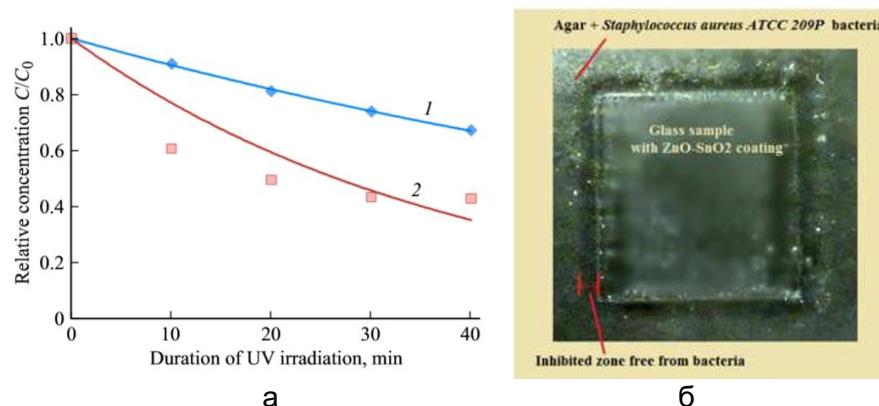


Рис. 3. Кинетические зависимости фоторазложения CSB в водном растворе в присутствии стеклянных пластин без покрытия (1) и с покрытием состава  $\text{ZnO}$  78,9 wt.-% (2) (а); антибактериальные свойства покрытия (б)

Полученные экспериментальные данные показывают, что полученные покрытия  $\text{ZnO-SnO}_2$  значительно ускоряют фоторазложение органического красителя в растворе.

На рис. 3, б представлены результаты анализа оксидного покрытия на бактерицидные свойства.

Анализ был проведен при помощи методики испытаний антибактериальной активности (определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам: методические указания. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 91 с.).

**Заключение.** Покрытия  $\text{ZnO-SnO}_2$ , полученные полимерно-солевым методом, состоят из маленьких, ориентированных и тесно упакованных оксидных кристаллов. По данным рентгенофазового и электронно-микроскопического анализов оксидные нанокристаллы имеют размер менее 100 нм и полностью покрывают поверхность стекла. Полученные покрытия способны генерировать активный синглетный кислород под действием внешнего УФ излучения и обладают высокими катализитическими и бактерицидными свойствами. Технологически простой полимерно-солевой метод обеспечивает получение однородных и прозрачных фотокатализитических покрытий  $\text{ZnO-SnO}_2$  на стеклах.

### Литература

1. Zhang H., Hu C. Effective solar absorption and radial microchannels of  $\text{SnO}_2$  hierarchical structure for high photocatalytic activity // Catalysis Communications. – 2011. – V. 14. – № 1. – P. 32–36.
2. Chatterjee D., Dasgupta S. Visible light induced photocatalytic degradation of organic pollutants // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. – 2005. – V. 6. – № 2-3. – P. 186–205.
3. Jašková V., Hochmannová L., Vytrášová J.  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  nanoparticles in photocatalytic and hygienic coatings // International journal of photoenergy. – 2013. – V. 2013. – 6 p.
4. Chiu W.S., Khiew P.S., Cloke M., Isa D., Tan T.K., Radiman S., Abd-Shukor R., Hamid M.A.Abd., Huang N.M., Lim H.N., Chia C.H. Photocatalytic Study of Two-Dimensional  $\text{ZnO}$  Nanopellets in the Decomposition of Methylene Blue // Chem. Engineering J. – 2010. – V. 158. – P. 345–352.
5. Ying Z., Jiabin Z., Weiquan C., Jun Z., Zhen L. Enhanced photocatalytic performance and degradation pathway of Rhodamine B over hierarchical double-shelled zinc nickel oxide hollow sphere heterojunction // Applied Surface Science. – 2018. – V. 430. – P. 549–560.

УДК 681.7.026.6

**ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КВАРЦЕВОГО ДАТЧИКА  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРОДЕЛИТЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ,  
ИЗГОТАВЛИВАЕМОГО ТЕРМИЧЕСКИМ ИСПАРЕНИЕМ В ВАКУУМЕ**

Ляменц Д.А.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Губанова Л.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрен метод радиочастотного контроля толщины слоя, формируемого из пленкообразующего материала (ПОМ), осаждаемого на поверхность оптической детали термическим испарением в вакууме. Проведен анализ источников ошибок измерений толщины осаждаемого слоя. Проведена оценка величины относительной погрешности, возникающей из-за колебаний температуры кварцевого датчика. Предложен способ уменьшения влияния температурных колебаний кварцевого датчика на измерение толщины осаждаемого ПОМ.

**Ключевые слова:** радиочастотный метод контроля, кварцевый резонатор, спектроделительные покрытия, технология оптических покрытий, термическое испарение в вакууме.

**Введение.** В настоящее время на участках производства интерференционных оптических покрытий термическим испарением в вакууме наиболее распространенными средствами контроля толщины осаждаемого слоя в процессе его формирования являются: фотометрические методы (одноволновой и широкоспектральный), а также радиочастотный метод.

В данной работе рассмотрен радиочастотный метод. Существуют работы, посвященные реализации и математическому описанию этого метода [1, 2]. Для дальнейшего анализа проблемы, рассмотренной в данной работе, стоит описать принцип, по которому работает радиочастотный контроль осаждаемого слоя в процессе его формирования. Этот метод контроля возможен, так как изменение частоты колебаний кварцевого резонатора пропорционально изменению массы кристалла кварцевого резонатора, который является чувствительным элементом этого метода контроля. На рис. 1 изображена структурная схема узла радиочастотного контроля.

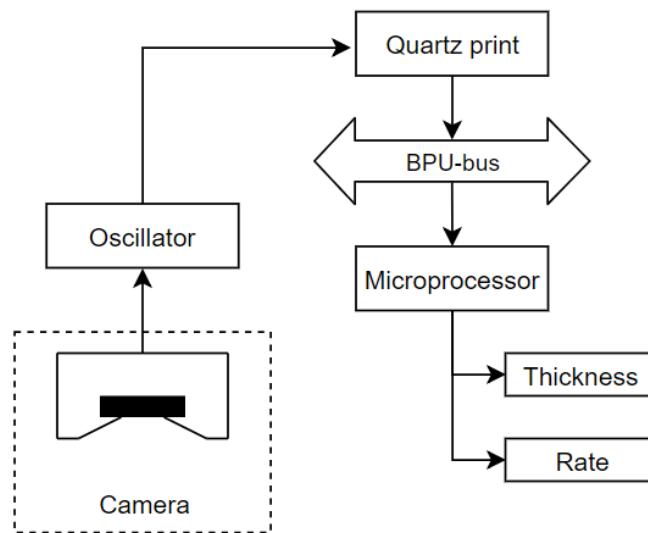


Рис. 1. Структурная схема радиочастотного метода контроля толщин

Кварцевый резонатор изображен на схеме в виде закрашенного черного прямоугольника, он располагается в объеме вакуумной камеры. Одна из сторон кварцевого резонатора открыта для потока испаряемого пленкообразующего вещества. При осаждении пленкообразующего материала (ПОМ) на кварцевый резонатор изменяется его масса, что вызывает изменение резонансной частоты кристалла. Это

изменение регистрируется блоком осциллятора и передается в блок микропроцессора, где на основании известных данных о геометрических размерах кварцевого резонатора и плотности ПОМ ведется расчет скорости осаждения ПОМ и формирующейся толщине слоя интерференционного покрытия.

К достоинствам метода часто относят простоту автоматизации процесса нанесения покрытия и возможность формирования неравнотолщинных слоев. Известными недостатками метода являются косвенный способ измерения (метод дает оценку геометрической толщине слоя, но не позволяет узнать формируемую оптическую толщину, от которой зависят спектральные характеристики покрытий), а также чувствительность характеристик кварцевого резонатора к изменениям его температуры. Наблюдения за действиями оператора вакуумной установки и поведением автоматической системы остановки осаждения ПОМ указывают также на инерционность процесса осаждения пленки, что нередко приводит к отклонениям реальной толщины формируемого слоя от требуемой.

**Материалы.** В качестве тестовой структуры было выбрано спектропропускательное покрытие, имеющее структуру: П14(ВН)В0.5Н. Роль подложки выполняла полимерная пленка, пленкообразующим материалом с высоким показателем преломления был выбран оксид титана  $TiO_2$ , ПОМ с низким показателем преломления использовался  $SiO_2$ . Изготовленное покрытие является отрезающим фильтром в ИК области. Расчетная спектральная характеристика такого покрытия представлена на рис. 2.

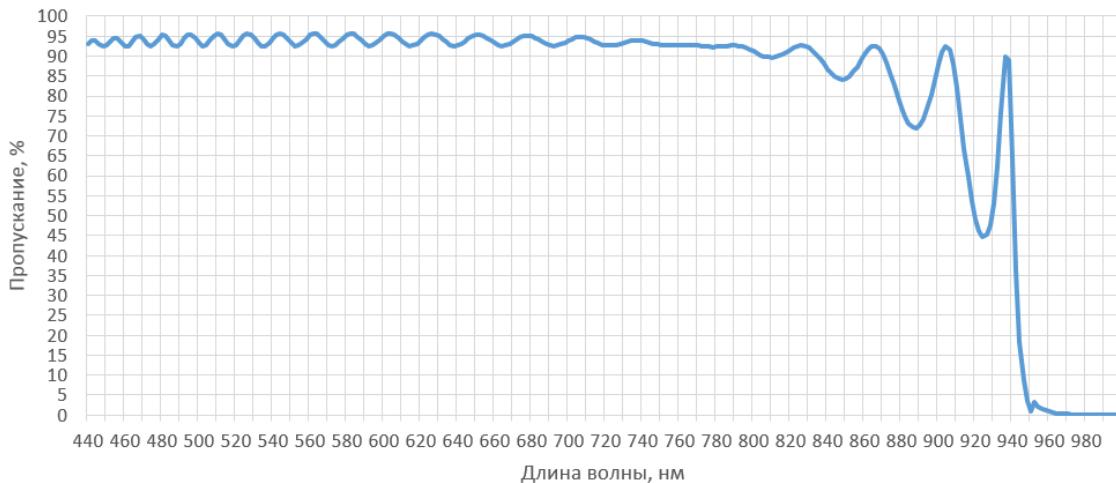


Рис. 2. Расчетная спектральная характеристика спектропропускательного покрытия. Изображена кривая пропускания. Структура покрытия П14(ВН)В0.5Н

Измерения колебаний температуры кварцевого резонатора проводились на установке Balzers BAK 760, оснащенной радиочастотным узлом контроля нанесения покрытий, двумя электронно-лучевыми испарителями, насосами механической откачки и диффузионным масляным насосом. Регистрация температуры кварцевого резонатора производилась датчиком температуры DS18B20 [3].

Блок кварцевого резонатора был оснащен проточной системой охлаждения. Последовательно с блоком кварцевого резонатора в магистраль охлаждения включена петля охлаждения диффузионного насоса. Температурный датчик расположен непосредственно рядом с выходным патрубком системы охлаждения кварцевого резонатора.

**Измерения.** В ходе процесса формирования интерференционного покрытия производилась запись температурных колебаний кварцевого резонатора. Стоит отметить, что температура испарения использованных в работе веществ довольно

высока, для оксида титана это  $2970^{\circ}\text{C}$ , а для диоксида кварца  $2230^{\circ}\text{C}$ . Оба вещества являются тугоплавкими и при осаждении на деталь (а также на поверхность кварцевого резонатора) не успевают полностью остыть. Также рядом с кварцевым датчиком находятся нагревательные элементы, которые способствуют прогреву подложкодержателя, на котором размещены оптические детали, чтобы обеспечить лучшую адгезию между ПОМ и приемной поверхностью. Эти факторы приводят к нагреву кварцевого резонатора и требуют его активного охлаждения.

Процесс формирования покрытия часто заключается в том, что на оптический элемент наносятся слои из разных материалов. Каждый материал имеет свою температуру испарения. При чередовании этих слоев часть теплового потока, который приходит на поверхность кварцевого резонатора изначально неравномерный и может служить источником ошибки измерений толщины формируемого слоя. Помимо этого, в ходе осаждения одного материала тепловой поток также колеблется, так как выполняется подстройка мощности испарителя, чтобы добиться равномерной скорости осаждения ПОМ.

При формировании структуры в ручном режиме оператор вакуумной установки обращает внимание на изменение частоты кварцевого резонатора, которое было получено при формировании каждого слоя. Оценивая величину отклонения между ожидаемой и реальной разницей в частотах, оператор корректирует величину следующего изменения частоты кварцевого резонатора и продолжает процесс. При типовом процессе формирования покрытия внимание температуре кварцевого резонатора не уделяется, считается, что при исправной системе охлаждения колебаниями температуры можно пренебречь. Часто чувствительный элемент блока радиочастотного контроля не имеет отдельного контура охлаждения, а включается последовательно с другими источниками тепла в системе (например, электронно-лучевым или резистивным испарителями). Что приводит к еще более непредсказуемым колебаниям температуры кварцевого резонатора. Такое влияние было зарегистрировано в другой серии измерений, где блок кварцевого резонатора был последовательно включен с ЭЛИ и резистивным испарителем в замкнутой системе охлаждения. Рис. 3 иллюстрирует влияние включения испарителей на температуру чувствительного элемента. Сплошная кривая – температура кварцевого резонатора, пунктирная кривая – температура теплоносителя на входе в блок кварцевого резонатора.

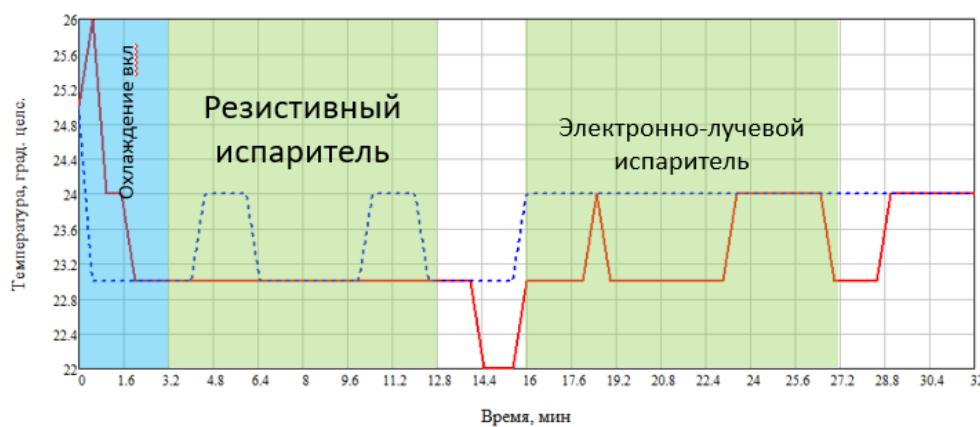


Рис. 3. Изменение температуры кварцевого резонатора в процессе формирования оптического покрытия

При проведении эксперимента внимание уделено не только температуре кварцевого резонатора в ходе формирования оптического покрытия, но и изменению частоты кварцевого резонатора в процессе нанесения каждого слоя. Этот набор данных позволил произвести расчет относительной погрешности измерений, вызванной колебаниями температуры кварцевого резонатора.

**Результаты.** Процесс нанесения 30 слоев пленкообразующих материалов занимает 3 ч, на нанесение каждого слоя затрачивается  $\sim 6$  мин. Изменение частоты на слоях оксида титана в среднем составило 1200 Гц, а на слоях диоксида кремния 1975 Гц. Среднее колебание температуры при формировании слоя составило  $0,5^{\circ}\text{C}$ , что соответствует тепловому отклонению резонансной частоты кварцевого резонатора 19,9 Гц [4]. Таким образом, относительно диапазона изменения резонансной частоты кварцевого резонатора на одном слое покрытия ошибка составляет для слоя, сформированного из оксида титана 1,66%, а слоя, сформированного из диоксида кремния 1%. Ошибка может иметь разный знак, так как температура может как возрастать, так и уменьшаться. Диаграмма, демонстрирующая относительную погрешность измерения для каждого слоя, приведена на рис. 4.

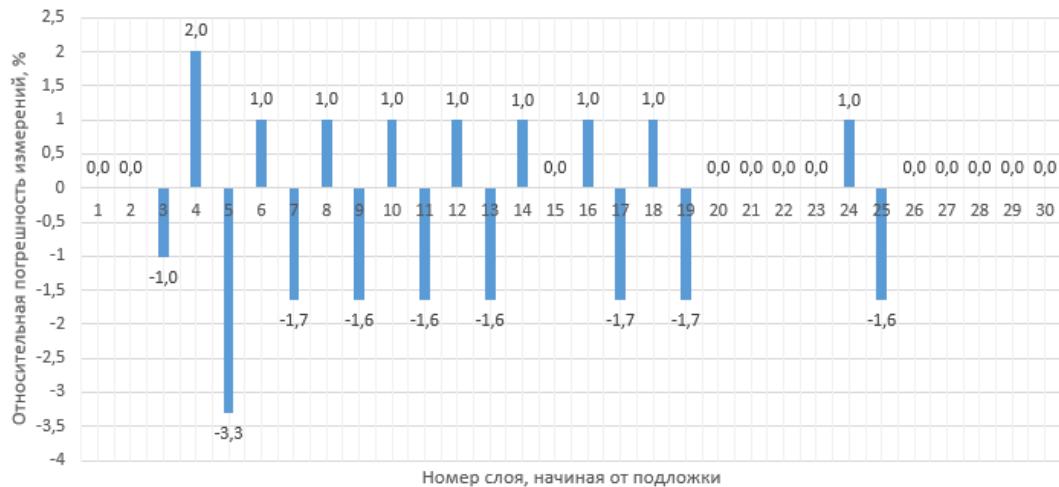


Рис. 4. Относительная погрешность измерений частоты кварцевого резонатора для каждого слоя

На рис. 5 приведено сравнение спектральной характеристики покрытия П14(ВН)В0.5Н, В–TiO<sub>2</sub> и Н–SiO<sub>2</sub>, 1 – характеристика покрытия, экспериментально изготовленного, 2 – расчетного.

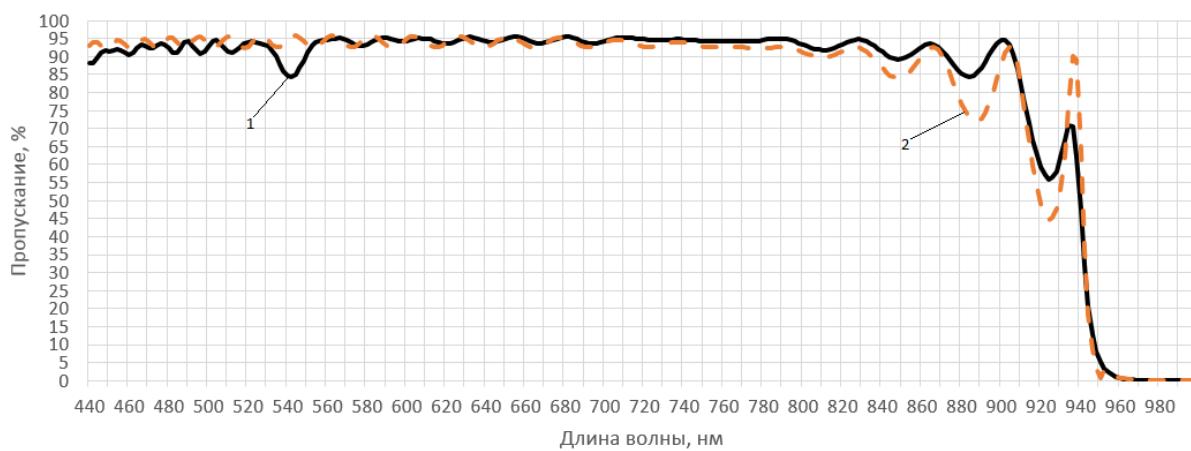


Рис. 5. Экспериментальный и расчетный спектры пропускания

Произведенные измерения колебаний температуры позволили получить относительную погрешность измерения частоты колебаний кварцевого резонатора для каждого слоя. Предположив, что изменения частоты прямо пропорциональны изменениям толщины осажденного слоя полученные относительные погрешности были внесены в толщины слоев для расчета, что позволило получить расчетную спектральную характеристику с учетом температурных колебаний кварцевого резонатора. Она представлена на рис. 6.

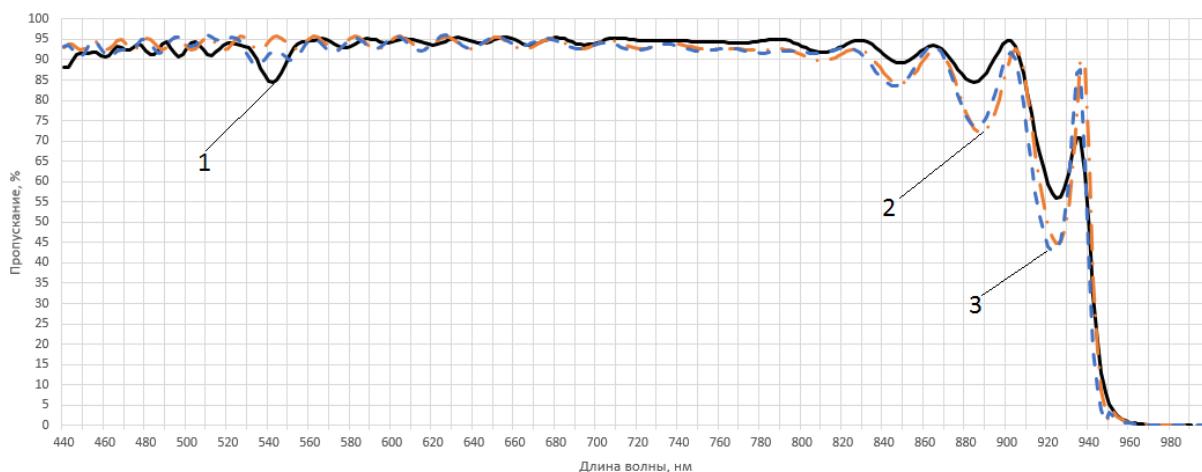


Рис. 6. 1 – экспериментальный; 2 – расчетный; 3 – расчетный с учетом температурных колебаний спектры пропускания покрытия: П14(ВН)В0.5Н

Из рис. 6 видно, что на диапазонах длин волн (530–560) нм, (800–840) нм и (870–900) нм расчетная кривая 3, которая учитывает колебания температуры кварцевого резонатора лучше описывает экспериментальную спектральную характеристику покрытия 1, чем кривая 2.

**Заключение.** В работе проведено исследование влияния колебаний температуры кварцевого резонатора на характеристики спектроределительного покрытия. Опираясь на измерения, полученные в данной работе можно дать рекомендации по организации систем охлаждения чувствительных элементов систем радиочастотного контроля. Рекомендуется организация выделенной системы охлаждения кварцевого резонатора с возможностью нагрева и стабилизации температуры кварцевого резонатора до ее номинальных значений, которые зависят от типа используемого кварцевого резонатора. Модернизировав узлы радиочастотного контроля таким образом можно уйти от влияния температурных колебаний кварцевого резонатора на точность измерений толщины осажденного слоя.

### Литература

1. Данилин В.С. Вакуумное нанесение тонких пленок. – М.: Энергия, 1967. – 312 с.
2. Willey R.R. Practical Design and Production of Optical Thin Films. – 4th ed. – Willey Optical, Consultants, 2016. – 644 p.
3. DS18B20 – maximintegrated.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>, своб.
4. Quartz Monitor Crystals // products.inficon.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://products.inficon.com/en-us/nav-products/product/detail/qcm-crystals/>, своб.

УДК 621.373.826

ГЕНЕРАЦИЯ СТУПЕНЧАТЫХ ИМПУЛЬСОВ В ЛАЗЕРАХ КЛАССА А  
С ПЕТЛЕВЫМИ ЗЕРКАЛАМИМаксимов И.З.<sup>1</sup>, Ковалев А.В.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.ф.-м.н. Ковалев А.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

Работа посвящена моделированию гибридного волоконного лазера с резонатором в форме восьмерки и нелинейным интегральным оптическим элементом. В работе представлено теоретическое объяснение возникновения динамических режимов, наблюдавшихся в эксперименте, в частности, режима генерации ступенчатых импульсов.

**Ключевые слова:** лазер с резонатором в форме восьмерки, усиливающее петлевое зеркало, прямоугольные импульсы, дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом.

**Введение.** Лазеры с резонатором в форме восьмерки находят широкое применение в различных областях, таких как обработка материалов, оптическая связь, спектроскопия и биомедицинские исследования. Конструкция резонатора такого лазера включает две петли, одна из которых является односторонней, а в другой, так называемом петлевом зеркале, излучение распространяется в обоих направлениях.

Можно классифицировать конфигурации петлевого зеркала на два типа. Если оно включает в себя усилитель, то такая конфигурация называется нелинейным усиливающим петлевым зеркалом или NALM (nonlinear amplifying loop mirror); иначе такое зеркало является пассивным и называется нелинейным оптическим петлевым зеркалом или NOLM (nonlinear optical loop mirror). В настоящей работе рассматривается первый вариант, с усилителем в составе петли [1].

Конфигурация лазеров на основе NALM является одним из наиболее популярных волоконно-оптических методов для генерации коротких импульсов (например, до нескольких десятков фс) с большой шириной спектральной полосы (десятки нм). В том числе, отдельные реализации лазеров с NALM позволяют осуществлять генерацию как традиционных импульсов гауссовой формы, так и прямоугольных импульсов. Последние находят свое применение в синхронизации, быстрой обработке сигналов, а также для оптического переключения. Одним из способов достичь генерации таких импульсов является эффект диссипативного солитонного резонанса (ДСР), который заключается в том, что при определенным образом подобранных параметрах дисперсии и нелинейности энергия солитонного импульса может принимать потенциально неограниченные значения, что приводит к его уширению и возникновению плато [2]. Прямоугольные импульсы, генерируемые с помощью ДСР, характеризуются достаточном малыми рабочими циклами, что может препятствовать некоторым приложениям. Например, рабочий цикл 50% полезен для тактирования, поскольку он позволяет использовать как передние, так и задние фронты в качестве триггеров тактовой частоты и, следовательно, минимизировать перекос тактовых сигналов [3]. Таким образом, динамическое управление профилями импульсов, которое предоставляет архитектура лазеров на основе NALM, дает преимущество использования единого простого источника. Однако, достижение универсального диапазона динамики импульса от одного устройства требует точного управления различными параметрами, такими как усиление, потери, и требует тщательного проектирования как нелинейности, так и дисперсионных свойств резонатора лазера. Следовательно, задача получить универсальные профили выходных импульсов от одного устройства остается сложной.

Настоящая работа посвящена моделированию гибридного волоконного лазера с резонатором в форме восьмерки и нелинейным интегральным оптическим элементом.

Целью работы является теоретическое объяснение возникновения динамических режимов, наблюдавшихся в эксперименте, в частности, режима генерации ступенчатых импульсов. Актуальность работы заключается в отсутствии теоретической модели, объясняющей имеющиеся экспериментальные данные [4, 5]. Практическая значимость работы заключается в перспективности использования таких лазеров, например, для генерации сигналов микроволнового диапазона, в нелинейной оптике, сенсорике, оптической обработке данных.

Для моделирования гибридного волоконного лазера с резонатором в форме восьмерки и интегральным нелинейным оптическим элементом была использована модель на основе дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом или DDE (delay differential equation). Модели на основе DDE успешно применяются для описания полупроводниковых лазеров с пассивной синхронизацией мод, а также других лазерных устройств, таких как лазеры со свипированием частоты [6] и различных многомодовых лазеров [7]. Для вывода таких моделей используется метод, основанный на так называемом подходе с сосредоточенными элементами, который позволяет получить дифференциальное уравнение с запаздыванием для временной эволюции электрического поля в некоторой фиксированной точке вдоль оси резонатора [8, 9].

**Модель.** Схема лазера гибридного лазера с NALM, содержащего волоконный усилитель, изолятор, полупроводниковый усилитель и нелинейный интегральный элемент, представлена на рис. 1.

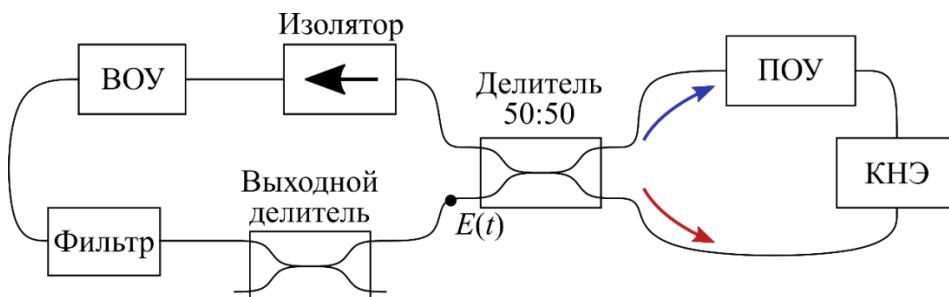


Рис. 1. Схема лазера с нелинейным усиливающим петлевым зеркалом (NALM).

На данном рисунке: ПОУ – полупроводниковый оптический усилитель; ВОУ – волоконный оптический усилитель; КНЭ – керровский нелинейный элемент. Стрелки указывают направление распространения поля внутри NALM. Точка показывает положение внутри резонатора, для которого определяется комплексная амплитуда электрического поля в модели

Уравнение модели, описывающей динамику лазера с NALM, выглядит следующим образом [4, 5, 9, 10]:

$$\gamma^{-1} \dot{E}(t) + E(t) = \frac{\sqrt{\kappa}}{2} \exp \frac{1}{2} [(1 - i\alpha) G_{SOA}(t-1) + G_{EDFA}(t-1) + i\rho |E(t-1)|^2 - 2i\chi] \times \left( 1 - \exp \left[ \frac{1}{2} i\rho |E(t-1)|^2 (\beta \exp G_{SOA}(t-1) - 1) \right] \right) E(t-1), \quad (1)$$

где  $E(t)$  – комплексная амплитуда поля;  $t$  – время, нормированное на время обхода резонатора;  $\gamma$  – безразмерная ширина внутрирезонаторного фильтра;  $\kappa$  – коэффициент внутрирезонаторной аттенюации интенсивности излучения;

$G_{SOA/EDFA}(t) = J_{SOA/EDFA} / (1 + S_{SOA/EDFA} |E(t)|^2)$  – функция, характеризующая насыщающееся усиление в полупроводниковом (SOA–ПОУ) или волоконном оптическом усилителе (EDFA–ВОУ);  $J_{SOA/EDFA}$  коэффициент слабосигнального усиления ПОУ/ВОУ;  $\alpha$  – фактор уширения линии полупроводникового усилителя;  $\rho$  – коэффициент нелинейности;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий асимметрию потерь и/или

нелинейности в плечах NALM;  $\chi$  – коэффициент, отражающий сдвиг ближайшей моды холодного резонатора относительно пика пропускания фильтра.

В данной модели рассматривается случай мгновенного отклика усиливающих сред и нелинейного элемента, т.е. подразумевается, что лазер принадлежит к динамическому классу А.

**Дискретное отображение и ступенчатые импульсы.** Появление прямоугольных импульсов в такой системе ассоциируется с высокой нелинейностью, приводящей к возможности переключения между двумя и более состояниями интенсивности на масштабах времени, ассоциированных со временем обхода резонатора. В пределе большой полосы пропускания фильтра или большого времени обхода уравнение (1) может быть переписано в виде дискретного отображения следующего вида:

$$\begin{aligned} |E_{n+1}|^2 = \kappa \exp\left(\frac{J_{SOA}}{1+S_{SOA}|E_n|^2} + \frac{J_{EDFA}}{1+S_{EDFA}|E_n|^2}\right) \times \\ \times \sin^2\left(\frac{1}{4}\rho|E_n|^2(1-\beta \exp\frac{J_{SOA}}{1+S_{SOA}|E_n|^2})\right) |E_n|^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n$  соответствует номеру обхода резонатора, а  $|E_n|^2$  – интенсивность излучения на  $n$ -ном обходе.

О существовании в данной системе прямоугольных двухуровневых импульсов, также наблюдавшихся в экспериментах, проведенных в INRS-EMT (Канада), сообщалось в [4, 5]. В настоящей работе мы фокусируемся на случае трехуровневых импульсов, имеющих вид нарастающей последовательности значений интенсивностей, также наблюдавшейся в этих экспериментах.

Такой динамический режим соответствует орбите периода 3 отображения 2. Получено два варианта такого отображения: со спадающей последовательностью интенсивностей (рис. 2, а) и с возрастающей последовательностью (рис. 3, а).

Ключевое отличие между данными режимами состоит в расположении значений интенсивности на разных участках функции отображения, задаваемой уравнением (2). В случае убывающей последовательности все значения находятся по правую сторону от первого максимума функции, в то время как для возрастающей последовательности одно из значений находится по левую сторону максимума, и одно значение находится близко к максимуму (рис. 2–3, б). Стоит отметить, что область существования данных режимов является достаточно малой, и при изменении параметров они переходят к орбитам периода 2, 4 или к хаотической последовательности интенсивностей, однако, определенные значения параметров являются реалистичными.

Для подтверждения того, что подобные трехуровневые импульсы действительно могут генерироваться в лазерной системе, моделируемой уравнением (1), значения интенсивности, полученные для отображения (2), были взяты в качестве начального значения интенсивности поля для тех же параметров модели. Результирующие временные диаграммы интенсивности приведены на рис. 2–3, в, что подтверждает существование режима генерации прямоугольных трехступенчатых импульсов как со спадающими, так и нарастающими уровнями интенсивности. Также были получены гармоники данных режимов (рис. 2–3, г) путем задания последовательности изменяющихся интенсивностей на временном интервале с длительностью  $t=3/7$  для тех же параметров. Возможны и другие гармоники данного режима, причем, период  $N$ -ной гармоники определяется как  $T=3/(3N+1)+\delta$ , где  $\delta \ll 1$  – некоторое малое число.

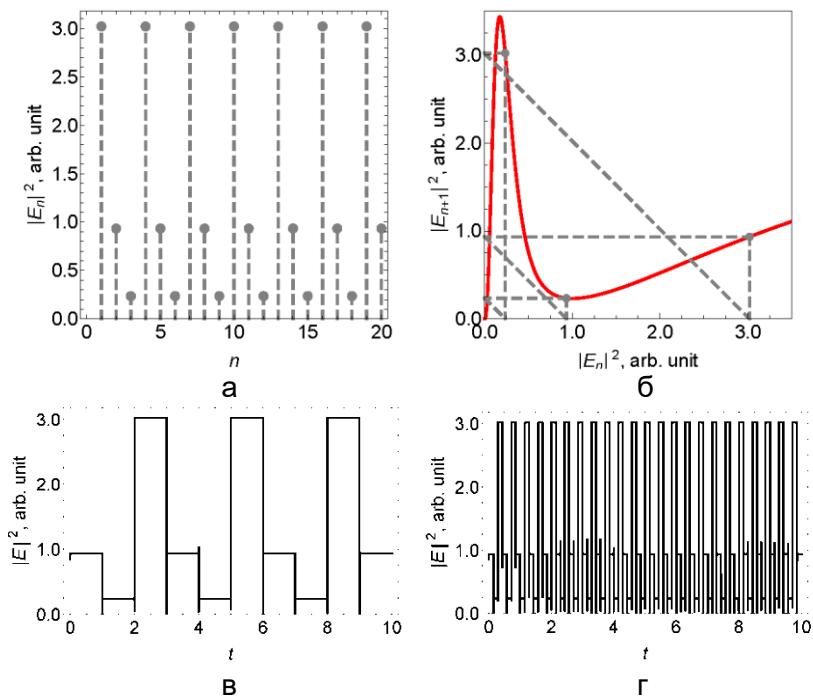


Рис. 2. Результаты моделирования трехступенчатых импульсов со спадающей интенсивностью в лазере на основе NALM: (а) – последовательность значений интенсивности для дискретного отображения (2), соответствующая орбите периода 3; (б) – красная линия – функция, задаваемая уравнением (2); серые точки – значения интенсивности поля; пунктирные серые линии приведены для наглядности и демонстрируют последовательность значений интенсивности, соответствующих орбите периода 3, показанной на рисунке (а); (в) – временная диаграмма, полученная при интегрировании модели (1) с начальными условиями, соответствующими (а); (г) – временная диаграмма, показывающая гармонику режима, приведенного на (г). Параметры:  $\gamma=20000$ ;  $\kappa=0,319$ ;  $J_{SOA}=3,19$ ;  $J_{EDFA}=1,5$ ;  $S_{SOA}=1$ ;  $S_{EDFA}=0,07$ ;  $\alpha=0$ ;  $\rho=2,93$ ;  $\beta=1,02$ ;  $\chi=0$

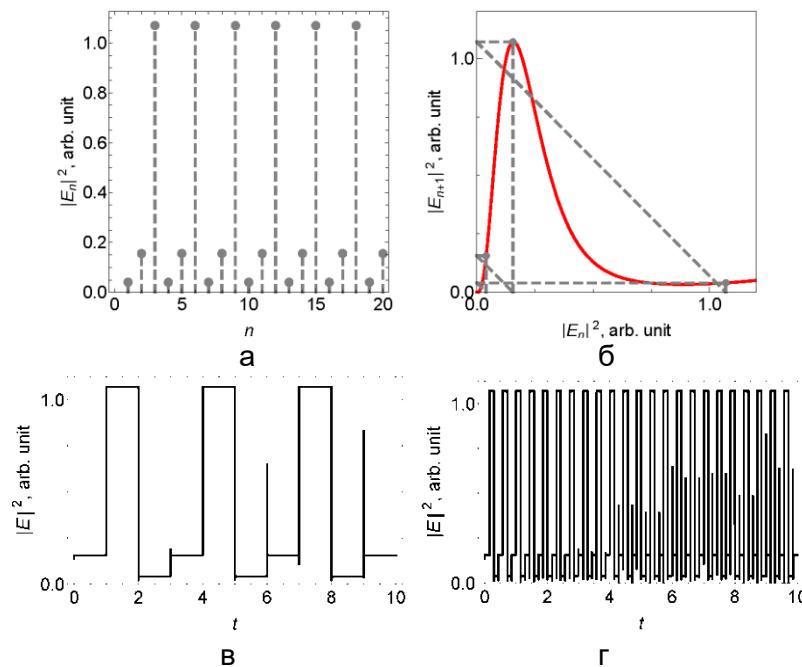


Рис. 3. Результаты моделирования трехступенчатых импульсов с возрастающей интенсивностью в лазере на основе NALM. (а)–(г) соответствуют (а)–(г) рис. 2, но для следующих параметров:  $\gamma=20000$ ;  $\kappa=0,1$ ;  $J_{SOA}=3,268$ ;  $J_{EDFA}=1,5$ ;  $S_{SOA}=0,999$ ;  $S_{EDFA}=0,17$ ;  $\alpha=0$ ;  $\rho=3,1$ ;  $\beta=0,95$ ;  $\chi=0$

Следует отметить, что на полученных временных диаграммах явным образом проявляется нестабильность фронтов импульсов, связанная с различиями между дискретным отображением и непрерывной динамической системой, задаваемой DDE, а также с наличием фазовой динамики в непрерывной модели. Тем не менее, длительное интегрирование показало, что основной трехступенчатый профиль найденных режимов сохраняется в течение более 500 обходов резонатора несмотря на достаточно большое число мод (при ширине фильтра  $\gamma=20000$ ), и таким образом, можно сделать вывод, что в данной системе потенциально существуют и стабильные трехступенчатые режимы.

**Заключение.** В работе представлены результаты моделирования лазерной системы, имеющей в своем составе NALM, на основе дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом. Показано, что в данной системе возможно существование режимов генерации трехступенчатых импульсов как со спадающей, так и с возрастающей последовательностью интенсивностей. Указанные режимы могут быть объяснены как возникающее вследствие высокой нелинейности переключение между состояниями интенсивности лазера, что продемонстрировано на основе дискретного отображения, построенного из DDE в пределе большой ширины фильтра. Полученные последовательности периода 3 дискретного отображения воспроизводятся в качестве прямоугольных импульсов моделью на основе DDE, причем, возможно сосуществование гармоник данных прямоугольных импульсов.

### Литература

1. Duling I.N. et al. Operation of a nonlinear loop mirror in a laser cavity // IEEE journal of quantum electronics. – 1994. – V. 30. – № 1. – P. 194–199.
2. Chang W. et al. Dissipative soliton resonances // Physical Review A. – 2008. – V. 78. – № 2. – P. 023830.
3. Young I.A., Greason J.K., Wong K.L. A PLL clock generator with 5 to 110 MHz of lock range for microprocessors // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1992. – V. 27. – № 11. – P. 1599–1607.
4. Aadhi A. et al. Dynamics of laser with an integrated nonlinear waveguide // Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). – 2018. – P. 1–2.
5. Kovalev A.V. et al. Figure-eight Laser with an Integrated Nonlinear Waveguide: All-optical Square-wave Generation // International Conference Laser Optics (ICLO). – 2018. – P. 445–445.
6. Slepneva S. et al. Dynamics of Fourier domain mode-locked lasers // Optics express. – 2013. – V. 21. – № 16. – P. 19240–19251.
7. Viktorov E.A., Mandel P., Huyet G. Long-cavity quantum dot laser // Optics letters. – 2007. – V. 32. – № 10. – P. 1268–1270.
8. Vladimirov A.G., Turaev D. Model for passive mode locking in semiconductor lasers // Physical Review A. – 2005. – V. 72. – № 3. – P. 033808.
9. Avrutin E., Javaloyes J. Mode-locked Semiconductor Lasers in Handbook of Optoelectronic Device Modeling and Simulation. – V. 2. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – P. 187–210.
10. Kovalev A.V. et al. Theoretical study of mode-locked lasers with nonlinear loop mirrors // Semiconductor Lasers and Laser Dynamics VIII. – 2018. – V. 10682. – P. 1068226.

УДК 535.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ  
ФОТОАКТИВНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ  
УСТРОЙСТВ**

**Матросова А.С.<sup>1,2</sup>, Евстропьев С.К.<sup>1</sup>, Миронов Л.Ю.<sup>1</sup>, Никоноров Н.В.<sup>1</sup>,  
Комаров А.В.<sup>2</sup>, Демидов В.В.<sup>2</sup>**

**Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Никоноров Н.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»

Экспериментально исследован образец волоконно-оптического сенсорного устройства для мониторинга состояния окружающей среды, принцип действия которого основан на явлении люминесценции. В качестве чувствительного элемента сенсора использовалась конструкция из многомодового волоконного световода с коэффициентом пропускания более 90%/м в спектральной области от 350 до 650 нм и кварцевого капилляра, заполненного эпоксиакрилатной композицией, активированной органическим комплексным соединением европия ( $Eu^{3+}$ ) с  $\beta$ -дикетоном. Установлен экспоненциально спадающий характер зависимости интенсивности преобразованного фотоактивным полимером оптического сигнала (длина волны возбуждения 355 нм, длина волны люминесценции около 615 нм) на выходе волоконно-оптического элемента от температуры в диапазоне значений от 20 до 100°C. Рассмотрена возможность использования такого волоконно-оптического элемента в качестве детектора ультрафиолетового излучения.

**Ключевые слова:** сенсор, волоконно-оптический элемент, люминесценция, фотоактивность, температура, ультрафиолетовое излучение.

**Введение.** На протяжении нескольких последних десятилетий на промышленных и военных производствах, а также объектах гражданского назначения активно внедряются сенсорные устройства различной конструкции для непрерывного мониторинга состояния окружающей среды. Из всего многообразия существующих датчиков выделяют волоконно-оптические, преимуществами которых относительно аналогичных по функциям устройств являются возможность детектирования параметров внешней среды в труднодоступных и удаленных местах, устойчивость к воздействию электромагнитного излучения и радиационному фону, компактность, надежность, высокая точность измерений.

По методу регистрации полезного сигнала волоконно-оптические датчики (ВОД) обычно классифицируют на внешние и внутренние [1]. В зависимости от принципа действия рассматриваемые устройства объединяют в следующие группы: интерферометрические, распределенные, сенсоры на основе решеток показателя преломления, люминесцентные и сенсоры на основе полимерных оптических волокон [2]. Обзор характеристик каждого из перечисленных типов устройств широко представлен в научно-технической литературе с указанием всех преимуществ и недостатков описываемых конструкций [3].

В настоящее время продолжает оставаться актуальным направление создания ВОД люминесцентного типа. Традиционно функционирование подобных сенсоров базируется на использовании эффекта флуоресценции, достигаемого за счет легирования материала сердцевины или оболочки световода фосфором или ионами редкоземельных металлов [4]. Вместе с тем область применения ВОД люминесцентного типа не ограничивается измерениями параметров окружающей среды. Такие устройства перспективны, в частности, для детектирования ультрафиолетового (УФ) излучения [5–8].

Развитие технологии получения функциональных материалов открывает возможности для использования в люминесцентных датчиках фотоактивных полимеров, значительно упрощающих их конструкцию и способ изготовления. Так, в работе [9] сообщается о применении в качестве термочувствительного материала

полимерной композиции, в состав которой введено органическое комплексное соединение европия ( $\text{Eu}^{3+}$ ) с  $\beta$ -дикетоном. Как оказалось, исследуемая композиция характеризуется сильным поглощением в ближней УФ области спектра и ярко-красной люминесценцией. Механизм регистрации изменения температуры окружающей среды датчиком на основе этой композиции заключается в определении времени жизни люминесценции возбужденных УФ излучением ионов  $\text{Eu}^{3+}$ . В работе [9] продемонстрировано трехкратное уменьшение времени жизни люминесценции ионов  $\text{Eu}^{3+}$  при увеличении температуры от 293 до 373 К. Величина абсолютной температурной чувствительности рассматриваемой полимерной композиции составляет в среднем – 5,5 мкс/К, что сопоставимо с аналогичным параметром хелатных комплексных соединений  $\text{Eu}^{3+}$  в составе другой полимерной матрицы.

**Экспериментальное исследование.** Для создания термочувствительного волоконно-оптического элемента (ВОЭ) была подготовлена фотоактивная полимерная композиция, состав которой оказался идентичен описываемому в работе [9]. Конструкция ВОЭ состояла из многомодового волоконного световода и кварцевого капилляра с внутренним диаметром около 0,5 мм длиной 2 см, заполненного термочувствительным материалом. В связи с необходимостью передачи одновременно возбуждающего излучения УФ диапазона и преобразованного полимерной композицией излучения видимого диапазона для экспериментального исследования был выбран световод с сердцевиной из кварцевого стекла с низким содержанием ОН групп диаметром 400 мкм, который характеризовался коэффициентом пропускания более 90%/м в спектральной области от 350 до 650 нм. Два отрезка такого световода длиной 7 м каждый с механически очищенными от защитного покрытия и отполированными торцами были помещены в кварцевый капилляр вплотную к фотоактивной полимерной композиции. Отверждение композиции осуществлялось под воздействием излучения УФ лампы в течение 1 мин.

Исследование чувствительности ВОЭ к изменению температуры окружающей среды производилось на экспериментальной установке, схематическое изображение которой представлено на рис. 1.

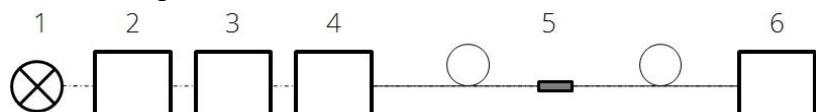


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования чувствительности ВОЭ к изменению температуры: 1 – источник излучения (ксеноная лампа); 2 – монохроматор; 3 – модулятор; 4 – элементы согласования; 5 – ВОЭ; 6 – фотоприемник

ВОЭ фиксировался на предметном столике таким образом, чтобы излучение от источника после прохождения через монохроматор и согласующие элементы фокусировалось на входном торце первого волоконного световода. Направленный ввод УФ излучения (длина волны  $\lambda=355$  нм) в полость капилляра, заполненную фотоактивной полимерной композицией, способствовал проявлению эффекта люминесценции. Регистрация преобразованного чувствительной средой оптического сигнала на выходном торце второго волоконного световода осуществлялась фотоприемником.

**Результаты исследования.** Для исследования температурной зависимости интенсивности оптического сигнала на выходе ВОЭ его термочувствительный элемент помещался в климатическую камеру. В результате серии испытаний был установлен экспоненциально спадающий характер изменения интенсивности в температурном диапазоне от 20 до 100°C (рис. 2, а). При температурах выше 100°C использование

рассматриваемой фотоактивной полимерной композиции в качестве чувствительной среды оказалось нежелательным вследствие деградации свойств органического комплексного соединения  $\text{Eu}^{3+}$  с  $\beta$ -дикетоном. Изменение интенсивности оптического сигнала в температурном диапазоне от +10 до  $-50^{\circ}\text{C}$  было незначительным. Выявить точный характер этой зависимости в эксперименте не удалось.

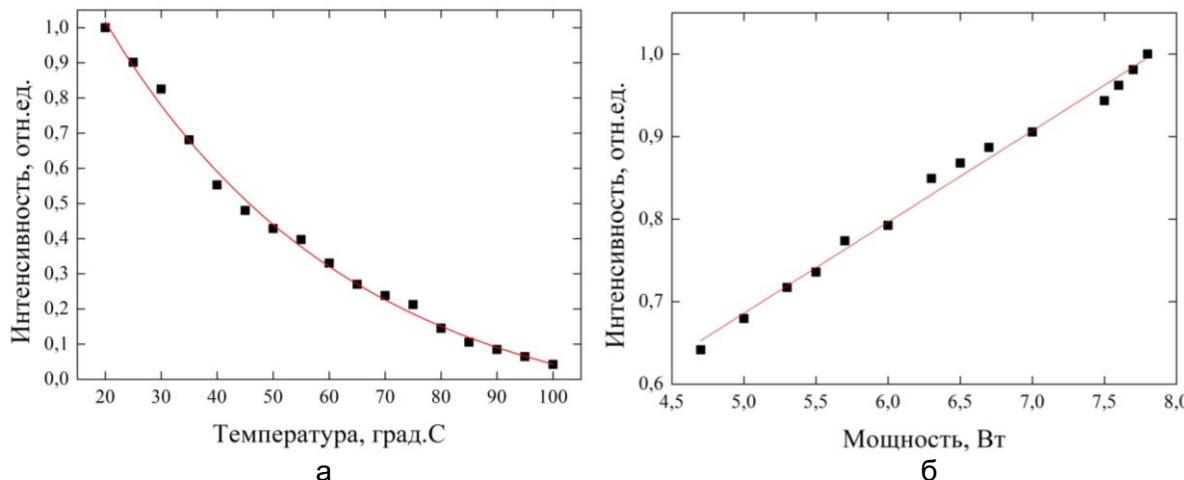


Рис. 2. Зависимость интенсивности оптического сигнала на выходе ВОЭ: от температуры (а); от мощности вводимого УФ излучения (б)

Необходимо отметить, что на достоверность показаний фотодетектора, регистрирующего распространяющийся по ВОЭ и преобразуемый фотоактивной полимерной композицией оптический сигнал, существенное влияние оказывает постороннее излучение. По этой причине для предотвращения искажения результатов испытаний доступ света к чувствительному элементу ВОЭ был ограничен.

Исходя из тех соображений, что используемая фотоактивная полимерная композиция характеризуется сильным поглощением в области ближнего УФ диапазона и имеет яркую люминесценцию в видимой части спектра, была рассмотрена и экспериментально изучена возможность применения ВОЭ в качестве детектора УФ излучения в окружающей среде. Для проведения такого исследования был подготовлен ВОЭ с конструкцией отличной от той, которая использовалась в предыдущем эксперименте. К кварцевому капилляру с идентичными геометрическими параметрами был подведен один отрезок многомодового волоконного световода длиной 2 м. Излучение ксеноновой лампы ( $\lambda=355$  нм) фокусировалось непосредственно на полость капилляра, заполненную фотоактивной полимерной композицией. Фотоприемник регистрировал интенсивность оптического сигнала в зависимости от мощности ксеноновой лампы.

В результате проведенного исследования был определен квазилинейный характер зависимости интенсивности оптического сигнала на выходе ВОЭ от мощности вводимого УФ излучения (рис. 2, б).

**Заключение.** В работе проведено экспериментальное исследование образца волоконно-оптического сенсорного устройства для мониторинга состояния окружающей среды, принцип действия которого основан на явлении люминесценции. В качестве чувствительного элемента сенсора использовалась конструкция из многомодового волоконного световода и кварцевого капилляра, заполненного эпоксиакрилатной композицией, активированной органическим комплексным соединением  $\text{Eu}^{3+}$  с  $\beta$ -дикетоном. Установлен экспоненциально спадающий характер зависимости интенсивности преобразованного фотоактивным полимером оптического сигнала (длина волны возбуждения 355 нм, длина волны люминесценции около 615 нм)

на выходе ВОЭ от температуры в диапазоне значений от 20 до 100°C. Одним из факторов зависимости можно рассматривать температурное тушение люминесценции. Обнаружено квазилинейное изменение интенсивности оптического сигнала на выходе описываемого ВОЭ от мощности вводимого УФ излучения, что позволяет рассматривать его в качестве детектора УФ излучения в окружающей среде.

### **Литература**

1. Jackson D.A., Grattan K.T.V., Meggitt B.T. Optical Fiber Sensor Technology. Optical and Quantum Electronics Series, V. 1. – Dordrecht: Springer, 1995. – 499 p.
2. Grattan K.T.V., Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview // Sensors and Actuators A: Physical. – 2000. – V. 82. – № 1-3. – P. 40–61.
3. Grattan K.T.V., Meggitt B.T. Optical Fiber Sensor Technology. Optoelectronics, Imaging and Sensing, V. 2. – Boston, MA: Springer, 1998. – 336 p.
4. Grattan K.T.V., Meggitt B.T. Optical Fiber Sensor Technology. Optoelectronics, Imaging and Sensing, V. 4. – Dordrecht: Springer, 1998. – 336 p.
5. Fitzpatrick C., O'Donoghue C., Lewis E. A novel multi-point ultraviolet optical fibre sensor based on cladding luminescence // Measurement Science and technology. – 2003. – V. 14. – № 8. – P. 1477.
6. Yan Y. et al. An optical fiber sensor based on La2O2S: Eu scintillator for detecting ultraviolet radiation in real-time // Sensors. – 2018. – V. 18. – № 11. – P. 3754.
7. Agafonova D.S. et al. Luminescent glass fiber sensors for ultraviolet radiation detection by the spectral conversion // Optical Engineering. – 2015. – V. 54. – № 11. – P. 117107.
8. Zmojda J. et al. Side-detecting optical fiber doped with Tb<sup>3+</sup> for ultraviolet sensor application // Fibers. – 2014. – V. 2. – № 2. – P. 150–157.
9. Mironov L.Y., Evstropiev S.K. Temperature-sensitive luminescent photopolymer activated by europium  $\beta$ -diketonate complexes // Optical Engineering. – 2019. – V. 58. – № 2. – P. 027113.

УДК 620.3.

**ВНЕДРЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ НЕОРГАНИЧЕСКОГО ПЕРОВСКИТА  
В ПОРИСТЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ МАТРИЦЫ**

Матюхина А.И.<sup>1</sup>, Шелдяков В.А.<sup>1</sup>, Соколова А.В.<sup>1</sup>, Черевков С.А.<sup>1</sup>, Дубовик А.Ю.<sup>1</sup>,  
Курдюков Д.А.<sup>2</sup>, Голубев В.Г.<sup>2</sup>, Баранов А.В.<sup>1</sup>, Ушакова Е.В.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Ушакова Е.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>ФТИ им А.Ф. Иоффе

В работе исследованы оптические отклики неорганических нанокристаллов  $\text{CsPbBr}_3$ , внедренных в пористую твердотельную матрицу на основе диоксида кремния. Показано успешное создание композитного люминесцентного материала, сохранившего оптические свойства, присущие коллоидному раствору нанокристаллов.

**Ключевые слова:** нанокристаллы, неорганические перовскиты, пористое стекло, композитные материалы, люминесценция.

**Введение.** В последние годы неорганические структуры с кристаллической решеткой типа перовскит привлекают внимание исследователей благодаря их уникальным оптическим свойствам, а также относительной простоте синтеза и его высокой воспроизводимости. Такие материалы являются идеальными для генерации оптического излучения и представляют большой потенциал для интеграции в такие оптоэлектронные системы как лазеры [1], светодиоды [2], солнечные элементы [3]. В литературе известны различные способы получения композитных материалов, например, создание пленок [4], внедрение в полимерные матрицы [5]. В данной работе композитные материалы были получены путем внедрения неорганических нанокристаллов (НК) перовскита химического состава  $\text{CsPbBr}_3$  в пористую твердотельную матрицу на основе диоксида кремния. Данный способ является перспективным, поскольку такая твердотельная матрица обеспечивает равномерность распределения НК в ее объеме и сохранение оптических свойств, присущих коллоидным растворам в условиях атмосферы.

**Материалы.** НК перовскита ( $\text{CsPbBr}_3$ ) были синтезированы по методике, описанной в работе [6]. Для этого 15 мл октадецена ( $\text{C}_6\text{H}_5$ ), 3 мл олеамина, 1,5 мл олеиновой кислоты и 0,54 миллимоль  $\text{PbBr}_2$  были смешаны в трехгорлой колбе. Полученный раствор дегазировался в течении 10 мин, а затем в течении 30 мин при температуре 100° перемешивался до полного растворения прекурсора. Для синтеза прекурсора олеата цезия 10 мл октадецена и 1 мл олеиновой кислоты были смешаны в двугорлой колбе и при постоянном перемешивании дегазированы при комнатной температуре в течении 30 мин; затем нагреты до температуры 150° под аргоном до полного растворения карбоната цезия. Полученный раствор олеата цезия нагревался до 170° и инжектировался в прекурсор ( $\text{PbBr}_2$ ). После 5" полученный раствор быстро охлаждался в ледяной ванне. Полученные НК были диспергированы в гексане. Средний размер НК составил 10±4 нм.

В качестве твердотельной матрицы использовались пористые стекла (средний размер пор 8 нм, объем пор 15%), которые были получены выщелачиванием натриево-боросиликатного стекла [7]. Перед внедрением НК стекла дополнительно отжигали в вакуумной печи при температуре 160°C в течении 30 мин, а затем после их полного остывания они были обработаны гексаном.

Композитные материалы на основе НК были получены методом капиллярной пропитки обработанных матриц. Для этого стекла помещались на коллоидный раствор НК объемом 100 мкл. Вследствие капиллярных сил коллоидный раствор НК проникал в поры матрицы. Образцы затем высушивались в течении суток в атмосфере, после чего

обрабатывались гексаном для удаления НК, не внедрившихся в поры, с поверхности стекла, и снова высушивались до полного испарения гексана. Фотография в ультрафиолетовом (УФ) свете, полученного коллоидного раствора НК, и СЭМ изображения пористых твердотельных матриц, представлены на рис. 1.

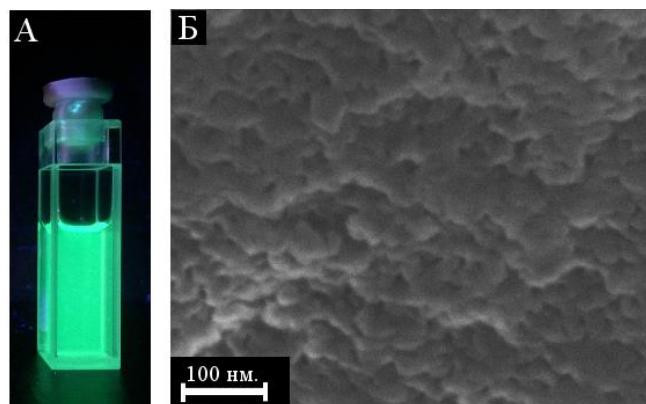


Рис. 1. Фотография коллоидного раствора нанокристаллов CsPbBr<sub>3</sub> в гексане при освещении УФ лампой (А); СЭМ-изображение твердотельной пористой матрицы (Б)

**Методы исследования.** Исследование оптических характеристик коллоидных растворов НК и композитных материалов на их основе осуществлялось с помощью спектрофотометра UV3600 (Shimadzu) с интегрирующей сферой и спектрофлуориметра Cary Eclipse (Agilent) с волоконной приставкой «Хобби». Для регистрации кинетики фотолюминесценции (ФЛ) был использован флуоресцентный конфокальный микроскоп MicroTime100 с возможностью время-коррелированного счета фотонов. Конфокальный лазерный сканирующий микроскоп LSM 710 (Zeiss) был использован для регистрации сигнала ФЛ и получения микро-изображений образца в проходящем свете. Сканирующий электронный микроскоп Merlin (Zeiss) был использован для исследования морфологии твердотельных матриц. Для оценки относительного квантового выхода коллоидного раствора НК использовался раствор родамина 6G в этаноле.

**Оптические характеристики коллоидных растворов нанокристаллов CsPbBr<sub>3</sub>.** Было проведено исследование оптических характеристик, полученных НК в коллоидном растворе. На рис. 2 представлены спектры поглощения и ФЛ, а также кривая затухания ФЛ.

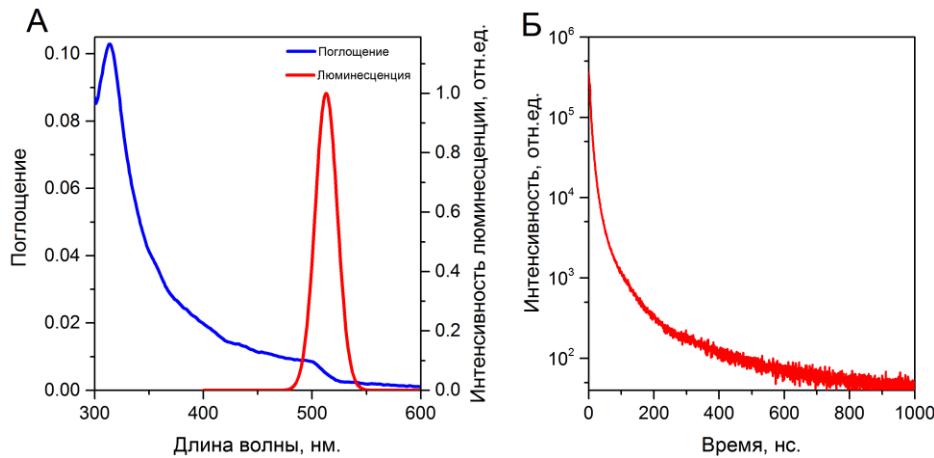


Рис. 2. Спектры коллоидных растворов НК CsPbBr<sub>3</sub>: спектр поглощения (синяя кривая) и ФЛ (красная кривая) при возбуждении светом с длиной волны 350 нм (А); кривая затухания ФЛ коллоидного раствора НК (Б)

Пик полосы ФЛ коллоидного раствора НК находится на длине волны 513 нм с шириной на полувысоте равной 24 нм. Кривая затухания ФЛ была аппроксимирована экспоненциальной функцией:

$$I(t) = I_0 + \sum_i A_i \exp(-t / \tau_i), \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность фонового сигнала;  $\tau_i$  – времена затухания компонент люминесценции;  $A_i$  – амплитуды соответствующих компонент;  $t$  – время.

Среднее время затухания было рассчитано как  $\langle \tau \rangle = \frac{\sum I_i \tau_i^2}{\sum I_i \tau_i}$  и составило 9,9 нс.

Квантовый выход, вычисленный относительно раствора родамина 6G, составил 55%.

**Исследование оптических откликов композитных материалов на основе НК перовскита.** Оптические характеристики НК в пористых стеклах были измерены сразу после внедрения и приведены на рис. 3.

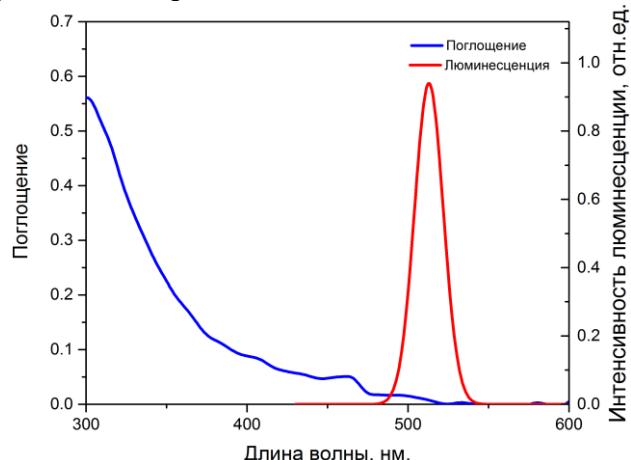


Рис. 3. Спектры поглощения (синяя кривая) и ФЛ (красная кривая) композитных материалов, длина волны возбуждения ФЛ 405 нм

После внедрения НК существенных отличий в их оптических характеристиках не наблюдалось, что свидетельствует об успешном внедрении НК в пористые матрицы. Образцы демонстрировали высокую однородность оптических откликов. Однородность внедрения подтверждается также люминесцентными микроизображениями, полученными с помощью конфокального сканирующего микроскопа (рис. 4, А).

Для того чтобы продемонстрировать успешность внедрения НК приблизительно в центре композитного материала был сделан скол механическим образом. 3D визуализация представлена на рис. 4, Б. Серой области соответствует край скола.

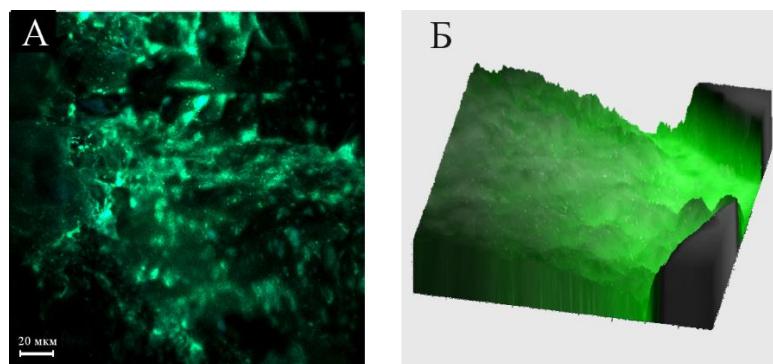


Рис. 4. Микроизображение в канале ФЛ образца (А); 3D визуализация скола в проходящем свете (Б)

Зарегистрированные оптические характеристики также сведены в таблице.

Таблица. Оптические свойства НК внедренных в пористое стекло

Образец	Положение пика люминесценции, нм	Полуширина, нм	Время жизни, нс
Коллоидный раствор	513	24	9,9±0,2
Пористое стекло	513	20	8,3±0,6

Видно, что оптические свойства композитных материалов в сравнении с коллоидным раствором НК практически остаются неизменными. Малое уменьшение времени затухания ФЛ НК, внедренных в пористую матрицу, скорее всего связано с увеличением каналов безызлучательной релаксации носителей заряда. Были также приготовлены образцы сравнения: НК были нанесены на стеклянную подложку из коллоидного раствора. Сигнал ФЛ от НК менее чем через 1 ч практически исчез.

**Заключение.** В ходе работы были синтезированы неорганические НК перовскита ( $\text{CsPbBr}_3$ ) с высокими оптическими характеристиками (относительный квантовый выход 55%), которые затем были внедрены в пористую твердотельную матрицу. Внедренные НК сохраняли свои оптические свойства по сравнению с НК, нанесенными на стеклянную подложку, что свидетельствует об успешном создании композитного люминесцентного материала на их основе. Кроме того, по предварительным оценкам, материал является стабильным в условиях атмосферы и сохраняет свои свойства в течении недели. Полученный результат является актуальным в области фотоники и может быть использован в дальнейшем для разработки новых материалов и устройств с высокими оптическими характеристиками.

### Литература

1. Chen S. et al. A Photonic Crystal Laser from Solution Based Organo-Lead Iodide Perovskite Thin Films // ACS Nano. 2016. – V. 10(4). – P. 3959–3967.
2. Xing J. et al. High-Efficiency Light-Emitting Diodes of Organometal Halide Perovskite Amorphous Nanoparticles // ACS Nano. – 2016. – V. 10. – P. 6623–6630.
3. Noel N.K. et al. Lead-free organic-inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications // Energy & Environmental Science. – 2-14. – V. 7(9). – 24 p.
4. Xiao M. et al. A fast deposition-crystallization procedure for highly efficient lead iodide perovskite thin-film solar cells // Angew Chem Int Ed. – 2014. – V. 53. – P. 9898–9903.
5. He J. et al. In situ synthesis and macroscale alignment of  $\text{CsPbBr}_3$  perovskite nanorods in a polymer matrix // Nanoscale. – 2018. – № 10. – P. 15436–15441.
6. Protesescu L. et al. Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites ( $\text{CsPbX}_3$ , X = Cl, Br, and I): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut // Nano Lett. – 2015. – V. 15. – № 6. – P. 3692–3696.
7. Багнич С.А. и др. Фосфоресценция ароматических соединений в пористой матрице натриево-боросиликатного стекла и их взаимодействие со стенками пор // Физика твердого тела. – 1995. – Т. 37. – № 10. – С. 2979–2986.

УДК 681.78

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ  
ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ НА РЕГИСТРАЦИЮ  
РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ АЛМАЗОВ ПРИ ИХ СЕПАРАЦИИ**

Медников С.В.<sup>1</sup>, Чертов А.Н.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Коротаев В.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрено влияние неравномерности чувствительности фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) на процесс детектирования рентгенлюминесцирующих алмазов. Приведены результаты исследований неравномерности чувствительности, ее максимальная величина и характер распределения по активной площадке ФЭУ. Показаны графики, отражающие характеристику чувствительности в зависимости от угла поворота площадки ФЭУ относительно источника излучения. Предложены варианты устранения неравномерности распределения чувствительности, а также дана оценка ее влияния на процесс регистрации рентгенлюминесцирующих алмазов при их сепарации.

**Ключевые слова:** рентгенолюминесценция, сепарация алмазов, неравномерность чувствительности, фотоэлектронный умножитель, селекция, рентгенлюминесцирующие алмазы.

**Введение.** Одной из актуальнейших проблем сепарации минерального сырья является селекция полезных минералов из общего объема руды [1]. В процессе селекции рентгенолюминесцирующих алмазов особой важностью является регистрация потока излучения [2]. Как правило, для этого применяются высокочувствительные приемники излучения, которыми являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) разных типов [3].

Однако, эти приемники обладают неравномерностью чувствительности по площадке, что снижает эффективность их применения при селекции рентгенолюминесцирующих алмазов.

Поэтому целью исследований является оценка влияния неравномерности чувствительности по активной площадке ФЭУ на процесс селекции. Для выполнения поставленной цели были осуществлены: разработка методики определения характеристик чувствительности ФЭУ, проведение экспериментальных исследований и поиск путей уменьшения влияния неравномерности чувствительности на процесс селекции.

**Постановка исследования.** Обнаружено, что основной вклад в снижение интегральной чувствительности вносит неравномерность чувствительности, обусловленная конструктивными особенностями динодной системы ФЭУ. Например, для различных образцов неравномерность может достигать 20–40% (рис. 1).

Методика исследования заключалась в последовательном сканировании фоточувствительной площадки ФЭУ точечным излучателем при постоянных смещениях излучателя от центра путем поворота площадки на равные углы.

Для исследования характеристик интегральной чувствительности ФЭУ предложена установка, структура которой приведена на рис. 2. Рабочим образцом выступает полупроводниковый излучающий диод (ПИД) 3, который питается от блока 1 током, контролируемым микроамперметром 2. ПИД 3 расположен на подвижной каретке 10, положение которой, определяется индикатором 11. Исследуемый фотоприемный канал состоит из объектива 4 и фотоприемника 5, на который подается рабочее напряжение от блока питания 8. Величина общего усиления электрического сигнала измеряется вольтметром 6 и может регулироваться подстроечным резистором 9. Выходной электрический сигнал с ФЭУ 5 регистрируется

микровольтметром 7. Испытуемая оптическая система с фотоприемником устанавливается на расстоянии  $z$  которое должно быть равно расстоянию до плоскости регистрации сигнала.

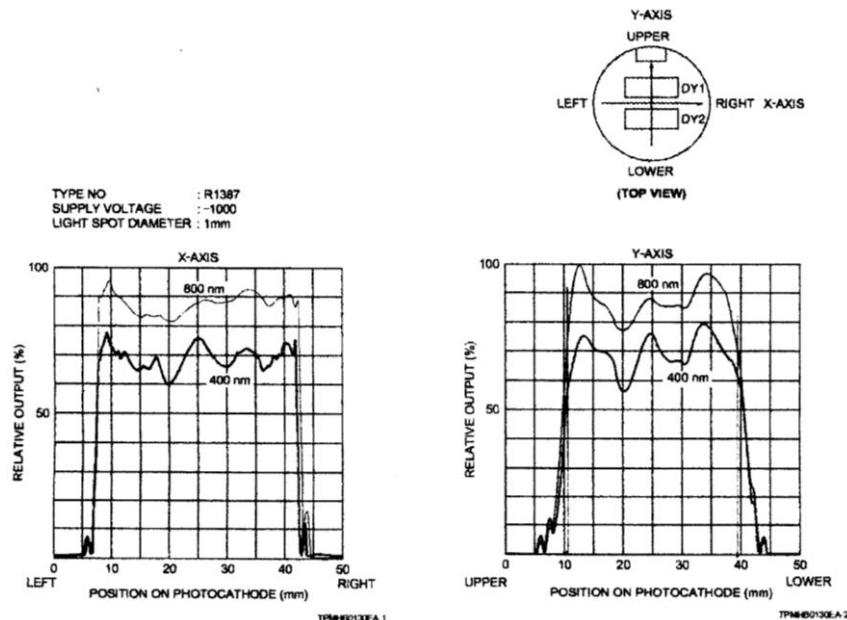


Рис. 1. Графики неравномерности чувствительности ФЭУ Hamamatsu R1387 по двум взаимно перпендикулярным направлениям для различных длин волн

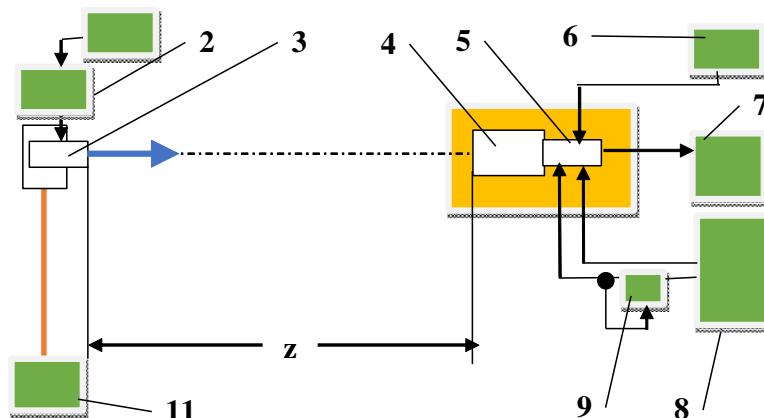


Рис. 2. Схема установки для измерения поля чувствительности ФК

В физическом эксперименте ПИД типа крепился в горизонтальной подвижке и устанавливался по центру фоточувствительной площадки. Для начального угла поворота  $0^\circ$  по милливольтметру 6 (рис. 2) снималось значение сигнала с ФЭУ типа R6094 фирмы Hamamatsu с торцевым входом. Затем площадка позиционировалась под углами с заданным шагом  $45^\circ$  (до полного поворота площадки). Показания милливольтметра регистрировались после каждого изменения положения образца. Затем ПИД последовательно смешался в радиальном направлении с шагом 2 мм. Для каждого смещения проводилась аналогичная серия измерений. Заключительная серия измерений проводилась при смещении ПИД равном 12 мм. Результаты измерений представлены на рис. 3 (графики 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 – для величин смещений 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 мм соответственно).

При расчете суммарной погрешности учитывались: случайная погрешность, обусловленная отклонениями температуры, внешними источниками колебаний, случайными изменениями характеристик ПИД и источников питания в ходе эксперимента; приборная систематическая погрешность, найденная исходя из классов

точности измерительных приборов, используемых в эксперименте [1]. Для повышения точности измерений, ФЭУ был предварительно выдержан под напряжением в течение часа и надежно защищен от засветок в процессе измерений [4]. Характер зависимостей, полученных при многократном повторении эксперимента, устойчиво повторялся. Это подтвердило расчетное значение погрешности измерений, которое составило 5%.

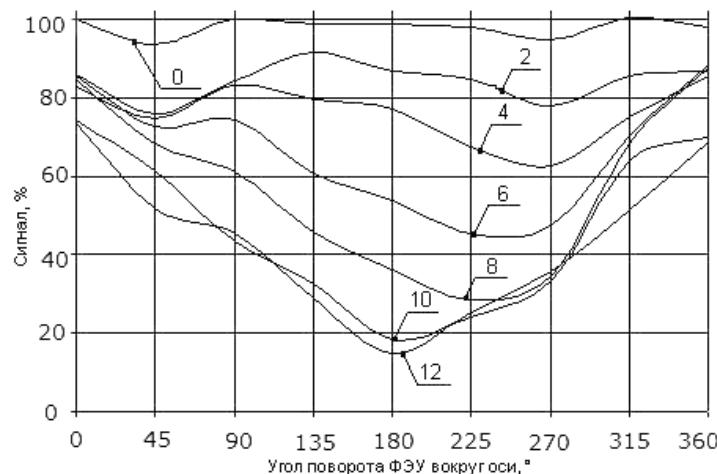


Рис. 3. Зависимость величины сигнала от радиального положения ФЭУ при различных смещениях светодиода от центра чувствительной площадки к ее краям

Анализируя полученные зависимости (рис. 3), наглядно отражающие распределение неравномерности чувствительности ФЭУ по площадке, можно отметить:

1. чувствительность ФЭУ максимальна в центре площадки, обладает центральной симметрией и имеет плавный характер спада, который составляет 12–40% в зависимости от образца;
2. эффективная площадь фотокатода ФЭУ ограничена кругом диаметром 12 мм, так как при смещении от центра чувствительной площадки к ее краю более чем на 6 мм, наблюдается падение уровня сигнала, превышающее допустимое (30%).

**Заключение.** Показано, что неравномерность чувствительности по площадке фотоэлектронного умножителя R6094 фирмы Hamamatsu может достигать 40%.

Показано, что эффективная площадь фотокатода ФЭУ R6094 фирмы Hamamatsu ограничена кругом диаметром 12 мм (при диаметре фотокатода 25 мм).

Доказана целесообразность проведения исследований апертурных характеристик ФЭУ.

Предложено применение конденсорной схемы для уменьшения влияния неравномерности чувствительности ФЭУ.

### Литература

1. Бубырь Е.В. и др. Повышение технологической эффективности рентгенолюминесцентных сепараторов алмазосодержащего сырья // Сб. трудов VI междунар. конф. Прикладная оптика. – 2004. – С. 18–21.
2. Чертов А.Н. Рентгенолюминесцентный метод обогащения алмазного сырья. Особенности регистрации алмазов в потоке руды. – Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 152 с.
3. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.
4. Араканцев К.Г., Похильный Р.А., Чертов А.Н. Исследование неравномерности чувствительности по площадке фотоэлектронных умножителей // Сб. научных трудов второй межвузовской конференции молодых ученых «Вестник». – 2005. – Т. 3. – С. 141–145.

УДК 681.7

**РАЗРАБОТКА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ**

Мельникова М.В.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.т.н. Васильев А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены оптические методы и способы базирования ОЭС при исследовании и мониторинге поверхности лесных массивов, их преимущества и недостатки. Разработана структурная схема оптико-электронного комплекса для мониторинга поверхности лесных массивов.

**Ключевые слова:** экологический мониторинг, дистанционное зондирование, многоспектральный, беспилотные-летательные аппараты, лесной массив.

**Введение.** Лесной фитоценоз представляет собой сообщество растительности различных видов, объединенное территорией произрастания, единством круговорота веществ и условий развития. Изменения в лесных сообществах, вызванные действием антропогенных и природных факторов (вырубки, пожары, поражения вредителями и др.), могут привести к деградации лесного фитоценоза, влекут за собой изменения в экосистеме в целом.

Основными функциями лесов являются: продуцирование органических веществ, очищение воздуха, защита почв от эрозии, место обитания животных, создание благоприятного климата для сельскохозяйственных растений и препятствие загрязнению вод. Кроме того, лес является ценным ресурсом для различных отраслей промышленности [1]. В Российской Федерации площадь лесов около 796,2 млн га, что составляет 45,4% от всей территории.

Для эффективного ведения лесного хозяйства, контроля и сохранения ценных ресурсов, оценки экологической обстановки необходимо проводить мониторинг лесных ресурсов, в частности: контроль хозяйственной деятельности человека в лесах, оценку последствий вырубок, оценку пирогенной трансформации фитоценоза и последствий поражения вредителями. Для достижения этих целей разрабатываемый комплекс должен определять видовой состав леса (хвойные, лиственные деревья), различать опавшую хвою, листву, травянистые растения.

**Постановка задачи.** На данный момент существует ряд методов исследования и мониторинга лесных массивов, которые можно разделить по типу используемой оптико-электронной системы (ОЭС) на телевизионные, многоспектральные и лидарные, а также по способу базирования системы на спутниковые, авиационные (с помощью пилотируемых и беспилотных средств), наземные. Достоинства и недостатки методов для наглядности сведены в таблице.

Таблица. Достоинства и недостатки методов мониторинга лесных массивов

Методы в зависимости от типа ОЭС		
	Достоинства	Недостатки
Телевизионные	стоимость, малые габариты, простота использования	сложность автоматизации процесса распознавания
Многоспектральные	высокоточные, разнообразие систем и конфигураций	сложность обработки изображения для детектирования
Лидары	высокоточные, работа в любое время суток, производительность	высокая стоимость, сильная зависимость от метеоусловий, хрупкость системы

Методы в зависимости от типа ОЭС		
	Достоинства	Недостатки
Спутниковые	широкая полоса обзора, автоматизация сбора данных, большие базы данных предыдущих исследований	малая оперативность, не подходит для небольших площадей, стоимость
Авиационные	грузоподъемность, устойчивость, возможность длительных полетов	экономически затратная организация полетов и содержания авиапарка, необходимость соблюдения графиков движения
БЛА	простая организация полетов, стоимость, возможность пролета на небольшой высоте	ограниченный радиус действия радиоканала
Наземные	возможность использования вышек сотовых операторов, автотранспорта	невозможность мониторинга труднодоступных мест, ограниченный радиус действия

Оптические свойства растений определяются способностью их листьев поглощать, пропускать или отражать солнечную энергию в определенных диапазонах, что в основном обусловлено содержанием в них хлорофилла [2, 3]. Синяя часть спектрального диапазона сильно поглощается хлорофиллом и наименее чувствительна к колебаниям его содержания. Наиболее сильно здоровая растительность отражает в зеленом диапазоне. На примере сенсора спутниковой системы RapidEye [4] можно выделить несколько эффективных диапазонов в рамках решаемой задачи:

- 520–590 нм – определяет общее состояние леса, позволяет классифицировать растительность в сочетании с другими диапазонами;
- 630–690 нм – анализ состояния растительности, состояние лесного покрова, классификация видов;
- 690–730 нм – преждевременное старение, нашествие вредителей;
- 760–850 нм – определение хвои, породного состава лесов, потери листьев, поражение вредителями.

Оптические свойства растительности позволяют распознавать определенные виды по спектральным данным, полученным при дистанционном мониторинге, более эффективно это решается совместно с такими данными как текстурные особенности изображения, высота произрастания.

Таким образом, для определения видового состава леса, идентификации опавшей листвы, хвои, травы целесообразно использовать многоспектральную систему, базирующуюся на БЛА, сочетающую в себе несколько каналов в разных спектральных диапазонах, а также устройство для определения высот.

**Результаты.** Разработана структурная схема оптико-электронного многоспектрального комплекса для мониторинга лесных массивов. Выбран тип построения системы с автономными оптическими каналами, каждый из которых содержит собственный матричный приемник оптического излучения. Такой вариант является простым решением и имеет возможность достижения максимального разрешения, так как для каждого спектрального диапазона используется отдельная оптическая система. Блочное построение такой системы позволяет выполнять независимую юстировку и настройку для каждого канала [5]. Структурная схема представлена на рисунке.

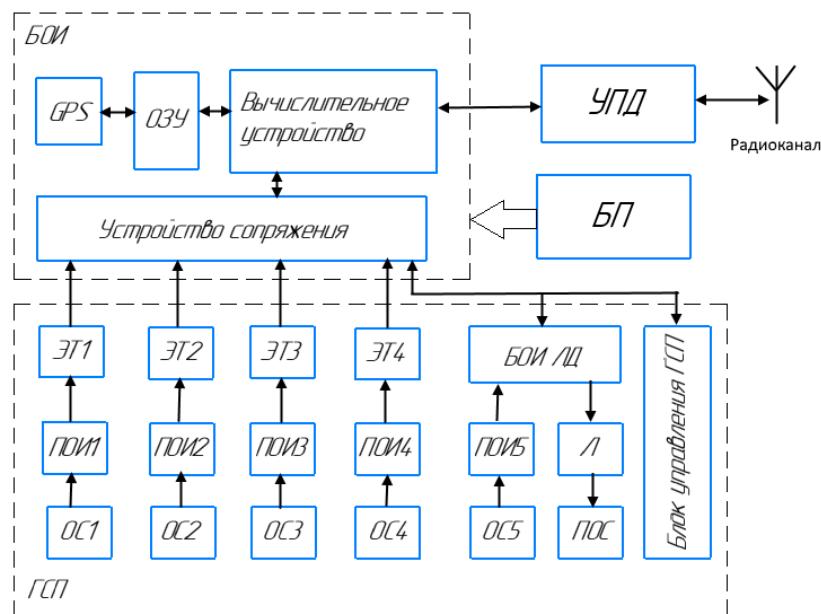


Рисунок. Структурная схема оптико-электронного комплекса для исследования поверхности лесных массивов

Четыре автономных оптических канала и канал лазерного дальномера располагаются на гиростабилизированной платформе (ГСП). ГСП обеспечивает стабилизацию оптических каналов и лазерного дальномера. Блок управления ГСП на основе получаемых данных позволяет регулировать положение платформы. Оптический канал содержит оптическую систему (ОС1, ОС2, ОС3, ОС4), приемник оптического излучения (ПОИ1, ПОИ2, ПОИ3, ПОИ4), сигнал с приемного устройства проходит предварительную обработку в электронном тракте (ЭТ1, ЭТ2, ЭТ3, ЭТ4). Лазерный дальномер включает в себя источник излучения – лазер (Л), передающую оптическую систему (ПОС), приемную оптическую систему (ОС5), приемник оптического излучения (ПОИ5), а также блок обработки информации (БОИ ЛД). Сигналы от электронных трактов оптических каналов, БОИ ЛД и блока управления ГСП поступают в устройство сопряжения, обеспечивающее их согласование, далее преобразованный сигнал поступает в вычислительное устройство для дальнейшей обработки. С помощью устройства передачи данных (УПД) сигнал передается по беспроводному каналу связи. GPS модуль обеспечивает пространственную привязку изображений [6].

**Заключение.** В работе проведен информационный анализ различных методов и средств мониторинга поверхности лесных массивов для решения задачи инвентаризации лесов и оценки экологической обстановки. Определен оптимальный метод базирования ОЭС с учетом достоинств и недостатков, а также выбран тип ОЭС, позволяющий определять видовой состав деревьев, основываясь на оптических свойствах лесной растительности. Схема дополнена лазерным дальномером, позволяющим определять высоты для более эффективного распознавания растительности.

Используя предложенную в работе конфигурацию системы, благодаря многоспектральной системе, установленной на гиростабилизированной платформе и лазерному дальномеру, можно эффективно определять видовой состав древесной растительности и полога леса, а значит вести контроль и оценку последствий воздействия антропогенных и природных факторов на лесные фитоценозы.

**Литература**

1. Степановских А.С. Экология: учебник для вузов. – М.: Юнити-Дана, 2001. – 703 с.
2. Алтынов А.Е., Малинников В.А., Попов С.М., Стеценко А.Ф. Спектрометрирование ландшафтов. Учебное пособие для студентов. – М.: Изд-во МИИГАиК, УПП «Репография», 2010. – 120 с.
3. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии / Пер. с нем. – М.: Мир, 1988. – 343 с.
4. Мониторинг лесов с помощью группировки спутников RapidEye/ А. Маркс/Геоматика 2008/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geomatica.ru/clauses/303/> (дата обращения: 25.01.2019).
5. Гаршин А.С. Исследование и разработка многоспектральных оптических систем с одновременной работой каналов: диссерт. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – СПб, 2016.
6. Васильев А.С. Исследование и разработка многоспектральной оптико-электронной системы комплексирования изображений для обнаружения и мониторинга лесных пожаров: диссерт. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – СПб, 2015.

УДК 535.341,539.264,539.232

## ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ БПЛА

Морозов И.С.<sup>1</sup>, Журавлев Н.В.<sup>1</sup>, Сандуленко А.В.<sup>2</sup>Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Григорьев Л.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»

В работе представлена адаптивная оптико-электронная система, обладающая лазерной динамической подсветкой, которая, без реализации сложной фазовой коррекции волнового фронта, позволяет обнаруживать цели с размерами 75–100 см на дистанции 800–1000 м при малой энергии импульса подсветки. Для обнаружения целей на дистанциях до 5–8 км необходимо увеличить энергию лазерного излучения в импульсе до 5 мДж.

**Ключевые слова:** БПЛА, локация, оптико-электронные системы, лазеры, дальнометрия.

**Введение.** Обнаружение и распознавание с борта БПЛА, находящегося на высотах до 3–5 км и двигающегося со скоростями в диапазоне 50–400 км/ч, малоконтрастных объектов, имеющих малые размеры, требует создания особой оптико-электронной системы идентификации объектов, которая обладает высоким разрешением и обеспечивает наблюдение в условиях предельных наклонных дальностей, с учетом влияния рефракции, поглощения, рассеяния и турбулентности атмосферы в любое время суток. Кроме того, такая система должна работать при наличии сложной помеховой обстановки. Задача построения систем, удовлетворяющих таким требованиям, приводит к необходимости использования активных оптико-электронных систем (ОЭС) [1]. Адаптивные ОЭС с динамической лазерной подсветкой являются наиболее перспективными для решения такого вида задач [2]. Такие ОЭС обладают двумя главными преимуществами в сравнении пассивными системами, работающими в аналогичных условиях: существенно снижено влияние помеховой обстановки и увеличена дальность обнаружения в 2–3 раза.

**Архитектура адаптивной оптико-электронной системы.** Активные ОЭС, работающие в диапазоне относительно небольших дистанций обнаружения малоконтрастных объектов в слабовозмущенной атмосфере, имеют ограничения предельной дальности обнаружения, обусловленные двумя оптическими процессами: рассеянием света на оптических неоднородностях, распределенных случайным образом на двойной длине оптической трассы, и поглощением света в среде распространения на двойной длине оптической трассы.

Оптическая схема приемо-передающего модуля рассматриваемой системы представлена на рис. 1.

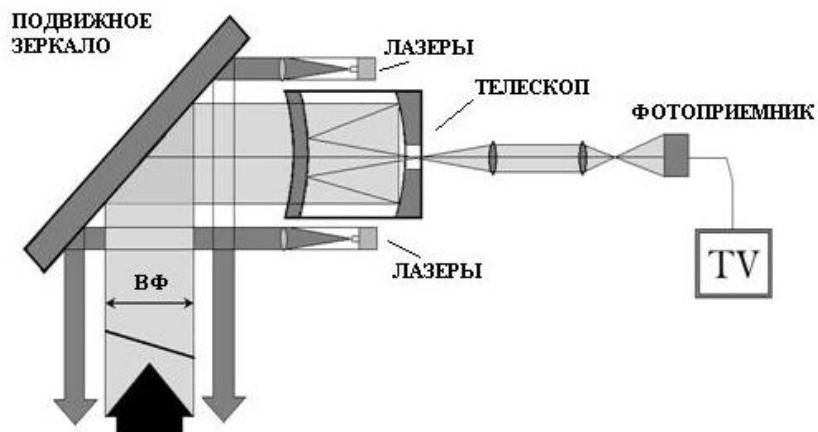


Рис. 1. Оптическая схема приемо-передающего модуля адаптивной ОЭС с лазерной подсветкой

Существенное снижение влияния помеховой обстановки на дальность обнаружения цели, а также увеличение в несколько раз дальности обнаружения малоконтрастной цели в сравнении с пассивными системами, работающими в аналогичных условиях, достигается использованием адаптивных ОЭС с лазерной динамической подсветкой [3]. Для таких систем, работающих на небольших и средних дистанциях обнаружения малоконтрастных объектов в слабовозмущенной атмосфере, вводится понятие предельных дальностей обнаружения, называемых «метеорологическая дальность обнаружения» или «метеорологическая дальность видимости цели». Для систем обнаружения, работающих на дальних дистанциях, дальность метеорологической видимости объектов не является определяющей характеристикой. Распространение луча в турбулентной атмосфере накладывает определенные ограничения на попытку реализации в таких системах угловых разрешений, близких к дифракционным при предельных дистанциях наблюдения. Пространственно-временные флуктуации оптической плотности атмосферного объема, определяемого диаметром телескопа, углом наблюдения и дальностью до цели, приводят к тому, что форма волновых фронтов, приходящих к приемной апертуре телескопа от элементов цели имеет сложную, меняющуюся во времени форму. Это свойство оказывает наибольшее влияние при диаметре приемной апертуры, сравнимой с размерами зон Фрида. Если размеры приемной апертуры меньше диаметра зон Фрида, то тип искажений формы волновых фронтов сводится в основном к наклонам, и происходит деформация изображений в виде смещений на фотоприемном устройстве без разрушения его структуры. Необходимым условием является выполнение условия, при котором время распространения света от цели до приемной апертуры меньше времени жизни зоны Фрида. Для совмещения мгновенных изображений можно применять только преобразование сдвига, что не требует громоздких и длительных вычислений для процедуры восстановления изображения [4, 5]. Применения импульсно-динамической лазерной подсветки позволяет осуществить предельный режим обнаружения и идентификации цели в условиях низкой метеорологической видимости, а также при условиях распространения оптического излучения в турбулентной атмосфере, с учетом рефракции.

Таким образом, использование адаптивной ОЭС, без реализации сложной фазовой коррекции волнового фронта, позволяет сделать систему наблюдения компактной, обладающей незначительным весом и позволяет использовать ее на борту БПЛА легкого класса.

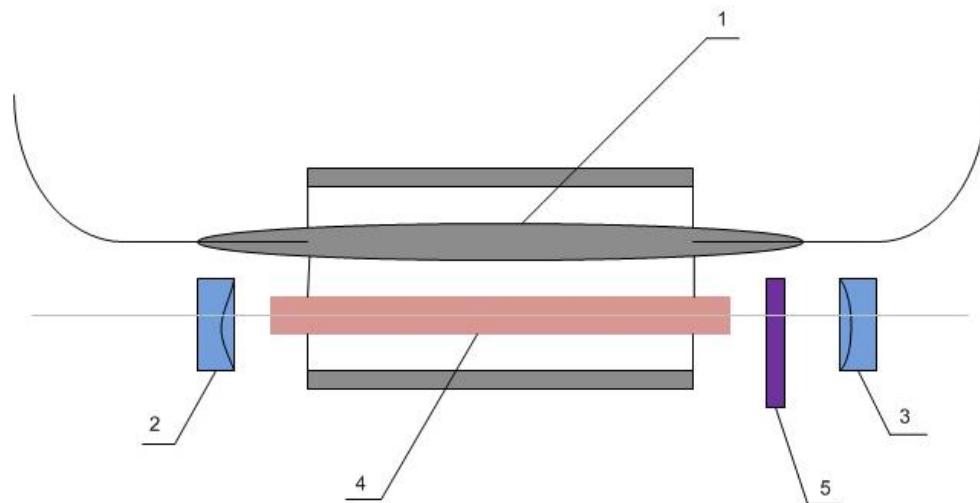


Рис. 2. Оптическая схема излучателя с ламповой накачкой и пассивной модуляцией добротности: 1 – лампа накачки; 2 и 3 – зеркала резонатора; 4 – активный элемент на основе кристаллов КГВ:Нd<sup>3+</sup>; 5 – пассивный затвор на основе АИГ:Cr<sup>4+</sup>

Длиннофокусная оптическая телескопическая система легла в основу рассматриваемой адаптивной ОЭС. Лазеры на основе кристаллов КГВ:Нd<sup>3+</sup> и пассивного модулятора добротности, работающих с длиной волны 1,06 мкм с ламповой накачкой, обеспечивают активную подсветку цели. Данные лазеры были выбраны из-за простой архитектуры, компактности, низких значений порогов генерации и максимальных значений выходной энергии в десятки мДж. Типовая оптическая схема такого излучателя представлена на рис. 2. Резонатор состоит из двух зеркал, активного элемента на основе кристаллов КГВ:Нd<sup>3+</sup> и пассивного модулятора добротности. В качестве модулятора добротности используются пассивные затворы на основе кристаллов алюмоиттриевого граната с четырехвалентным хромом АИГ:Cr<sup>4+</sup>.

В настоящее время одним из требований к лазерам, входящим в оптико-электронные дальномерные системы, является использование диапазона волн, безопасного для человеческого глаза, что определило необходимость использовать лазеры с ВКР – самопреобразованием в данной работе. Основу элементной базы такого лазера составляют активные элементы на основе кристаллов калий гадолиниевого вольфрамата, активированных неодимом КГВ:Нd<sup>3+</sup>, и пассивные затворы на основе кристаллов алюмоиттриевого граната с ванадием АИГ:V<sup>3+</sup>. Излучение перехода неодима с длиной волны 1,35 мкм получаемое в кристаллах КГВ:Нd<sup>3+</sup> режиме гигантского импульса с использованием пассивного затвора на основе АИГ:V<sup>3+</sup> преобразуются в излучение с длиной волны 1,54 мкм через процесс вынужденного комбинационного рассеяния. При этом вынужденное комбинационное рассеяние происходит в активном элементе КГВ:Нd<sup>3+</sup>. Схема такого лазера приведена на рис. 3.

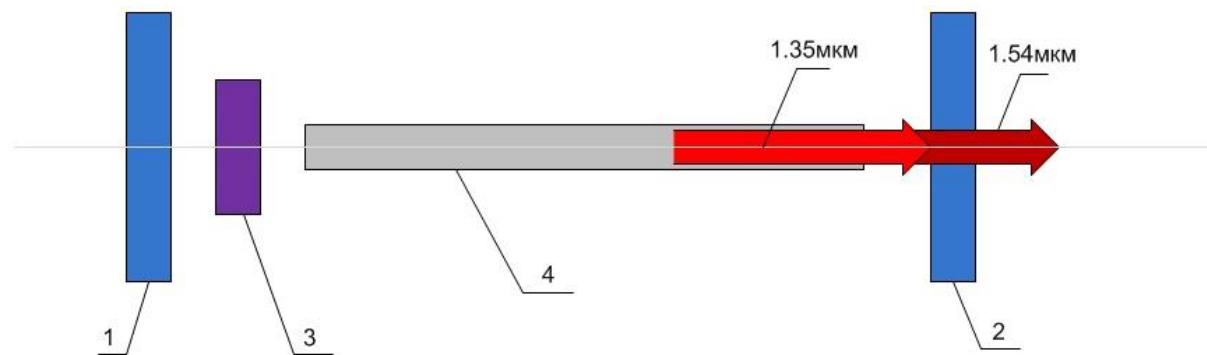


Рис. 3. Оптическая схема типовой элементной базы лазера с ВКР-самопреобразованием и пассивной модуляцией добротности: 1 – глухое зеркало; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – пассивный затвор на основе АИГ:V<sup>3+</sup>; 4 – активный элемент на основе кристаллов КГВ:Нd<sup>3+</sup>

Это позволило создать компактные излучатели с рабочей длиной волны 1,54 мкм, сохранив архитектуру, габариты и параметры накачки предыдущего излучателя на 1,06 мкм. Значения выходной энергии таких излучателей составляли 1–10 мДж.

Общая схема рассматриваемого комплекса с лазерной динамической подсветкой представлена на рис. 4.

В турбулентной атмосфере, угловые размеры области в которой волновой фронт может считаться неизменным, не превышают величины 8–10 угл. сек. В этой связи указанная величина ограничивает пространственную область наблюдения, в пределах которой можно существенно приблизиться к дифракционному пределу разрешения используемой телескопической системы. Например, при фокусном расстоянии объектива 2,0 м величина области резкого изображения будет ограничена размерами приблизительно 100×100 мкм, что при размерах пикселя анализатора изображения 8–10 мкм дает максимальное число элементов резкого изображения 10×10 шт. Оценка потока квантов, приходящихся на один элемент изображения, основанная на принятых

выше характеристиках камеры, выглядит следующим образом:

$$pQ(l) = W\tau \frac{e^{-2lx}}{(la)^2\pi} \frac{(A^2\lambda dSp)}{8hc}, \quad (1)$$

где  $A$  – относительное отверстие объектива камеры;  $dSp$  – приведенная к плоскости фотокатода ЭОП-а площадь элемента изображения.

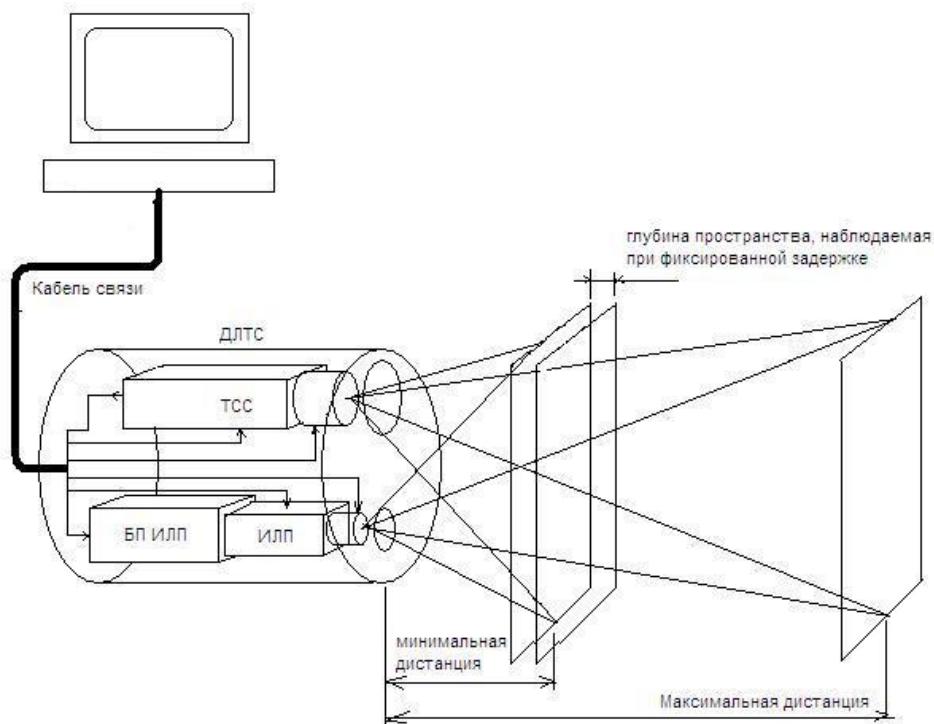


Рис. 4. Схема рассматриваемого комплекса с лазерной подсветкой

Расчет по этой формуле дает число квантов света, приходящихся на один элемент изображения матричного ФПУ не превышающее 7 квантов на один пиксель.

**Адаптивная оптико-электронная система обнаружения малоконтрастных целей в сложной помеховой обстановке.** Для изучения влияния метеорологических явлений на дальность обнаружения при различных энергиях лазерного импульса подсветки была создана малогабаритная атмосферная адаптивная оптико-электронная система обнаружения малоконтрастных целей в условиях различных осадков и тумана. Источник излучения – лазер на основе кристалла КГВ:Нd<sup>3+</sup>. Энергия импульса лазера составляла 0,6 мДж, частота следования импульсов была равна 1 кГц, длина волны излучения составляла 1,06 мкм, длительность импульса находилась в диапазоне 10–20 нс. Суммарный объем оптико-электронной системы не превышал 1,2 л. При тумане средней плотности эквивалентная оптическая толщина трассы на диаметре цели составила  $\tau=2-3$ . Частота кадров находилась в диапазоне 5–30 Гц.

При таких оптических характеристиках трассы наблюдения максимальная дальность обнаружения цели с размером, находящемся в диапазоне 75–100 см, составила 800–1000 м в зависимости от флуктуации плотности метеорологических явлений.

При увеличении энергии лазерного излучения в импульсе до 5 мДж дальность обнаружения цели составила 5–8 км.

**Заключение.** Таким образом, использование адаптивной оптико-электронной системы, без реализации сложной фазовой коррекции волнового фронта, позволяет обнаруживать цели с размерами 75–100 см на дистанции 800–1000 м в зависимости от

флуктуации плотности атмосферных явлений при энергии импульса лазерного излучения 0,6 мДж. Система позволяет увеличить дальность обнаружения цели до 5–8 км, увеличив энергию лазерного излучения в импульсе до 5 мДж и сохранив остальные параметры системы неизменными.

Перспективным направлением развития с ВКР-самопреобразованием и пассивной модуляцией добротности этого лазера является распространение его работы на область частот повторения десятков-сотен герц при использовании поперечной полупроводниковой накачки и без принудительного водяного охлаждения.

### **Литература**

1. Воробьев В.И. Оптическая локация для радиоинженеров. – М.: Радио и Связь, 1983. – 177 с.
2. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 351 с.
3. Мусыяков М.П., Миценко И.Д., Ванеев В.Г. Проблемы ближней лазерной локации. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 295 с.
4. Бакушинский А.Б., Гончарский А.В. Некорректные задачи. Численные методы и приложения. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 199 с.
5. Зуев В.Е. Сигналы и помехи в лазерной локации. – М.: Радио и Связь, 1985. – 264 с.

УДК 544.032.65

**ФОТОСТАБИЛЬНОСТЬ АКРИЛАТ-УРЕТАНОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ  
С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА**

Морозов Н.К.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Бурункова Ю.Э.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрена фотостабильность акрилат-уретановых нанокомпозитов с наночастицами золота (НЧЗ) при различных режимах облучения (nano- и фемтосекундным излучением) в зависимости от мономерного состава и концентрации наночастиц. Проведены экспериментальные исследования фотостабильности нанокомпозитов (НК) с НЧЗ. Определены плотности энергии излучения, при которых проявляются видимые дефекты на нанокомпозите и происходит оптический пробой материала. Проведен анализ облученных образцов на оптическом микроскопе и интерферометре. Определены наиболее устойчивые к облучению нанокомпозиты с НЧЗ.

**Ключевые слова:** фотостабильность, наночастицы золота, нанокомпозиты, оптический пробой, порог разрушения, плазмонный резонанс.

**Введение.** На сегодняшний день все более остро встает вопрос о создание оптических систем и сенсоров на основе нанокомпозитов (НК), которые по своим физическим, химическим и механическим свойствам не уступали, а даже превосходили другие аналоги. Перспективным направлением исследований является введение наночастиц благородных металлов, в частности наночастиц золота (НЧЗ), в различные органические матрицы. Как известно наночастицы золота обладают каталитическими, ферромагнитными и др. свойствами. При введении НЧЗ в НК можно регулировать оптические свойства в зависимости от условий облучения и задач использования. Оптические свойства наночастиц золота обуславливаются плазмонными колебаниями электронов в металле. Поэтому при введении НЧЗ в полимерный НК можно получить материал с эффектом локализованного плазмонного резонанса, с ультрабыстрым нелинейным оптическим откликом, а также НЧЗ проявляют гигантский электронный эффект Керра. Исследуемые НК используют для создания фотонных структур на их основе голографическим методом (интерференция когерентных лазерных пучков). Наличие упорядоченной структуры может существенно увеличить полезные и функциональные свойства материалов и повысить эффективность создаваемых на их основе устройств. Поскольку при записи данным методом требуется использование больших плотностей мощности облучения или облучение материала в течении длительного времени, то требуется точное исследование фотостабильности композиций, из которой изготовлен материал [1–6].

**Схема установки для облучения НК.** Исследования проводились на установках на основе фемтосекундного лазера (Ti:S).  $L=806$  нм, импульсный режим с частотой 1 Гц и на основе наносекундного лазера SOLAR TII модель LF117 с активной средой алюмогранат («YAG», Y3Al5O12), легированный ионами неодима (Nd), используемая гармоника – 1064 нм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 210 мДж.

Схема установки для исследования представлена на рис. 1.

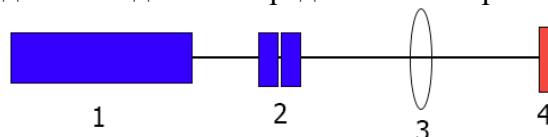


Рис. 1. Схема используемой установки для определения порога разрушения.

Фемтосекундное облучение: 1 – лазер(Ti:S); 2 – ослабляющие фильтры; 3 – линза;

4 – подвижка с креплением для исследуемого образца. Наносекундное облучение:

1 – лазер SOLAR TII LF117; 2 – ослабляющие фильтры; 3 – линза ( $f=70$  мм);

4 – подвижка с креплением для исследуемого образца

**Используемые материалы.** Полимерные нанокомпозиции были приготовлены из следующих компонентов:

- мономеры: 2-карбоксиэтилакрилат (2Car, Aldrich № 552348), Диуретан диметилакрилат, смесь изомеров (UDMA, ≥97%, Aldrich № 436909), Изодецил акрилат (IDA, Aldrich № 408956), Этиленгликоль фениловый эфир акрилата (PEA, Aldrich № 408336-250ML);
- силаны: Триметоксиоктил силан (TOS, 96%, Aldrich № 376221-25ML), 3-Аминопропил триметоксисилан (APS, Aldrich № 281778);
- инициаторы: Два(цикlopентадиэниловый)два[2,6-дифлюоро-3-1-пиррилфениловый]титан (Irq784, CAS № 125051-32-3);
- наночастицы: Наночастицы золота, стабилизированные монослоем 1-додекантиола (Au NPs – 0,15%, Aldrich № 660434). В нанокомпозиты вводили НЧЗ в количествах 0,15% от массы мономера. Наночастицы кремния, модифицированные триметокси(октил)силаном ( $\text{SiO}_2$  – 9%, Aldrich № 376221). В нанокомпозиты вводили  $\text{SiO}_2$  в количествах 0,9% от массы мономера;
- нанокомпозиты, используемые в работе, были получены из выше перечисленных веществ и имеют обозначения: 1a, 1a Au (система 1), 2a и 2a Au (система 2). Написание «Au» в название НК означает наличие в его составе НЧЗ (табл. 1).

Таблица 1. Значения плотностей мощности порогов разрушения для пленок из составов 1a, 1a Au (система 1), 2a и 2a Au (система 2), полученные в экспериментах после облучения фемтосекундным лазером

Состав	Видимые дефекты	Оптический пробой	Размер пятна оптического пробоя, мкм
	Плотность энергии, Дж/см <sup>2</sup>		
1a	$0,6 \times 10^{-3}$	$0,84 \times 10^{-3}$	294
1a AU(0,015%)	$0,6 \times 10^{-3}$	$0,84 \times 10^{-3}$	304,7
2a	$0,595 \times 10^{-3}$	$0,83 \times 10^{-3}$	270
2a AU(0,015%)	$0,5952 \times 10^{-3}$	$0,84 \times 10^{-3}$	140

**Результаты.** На рис. 2 показана типичная поверхность образцов одного из состава после лазерного воздействия, на ней видны дефекты, возникающие при оптическом пробое. Поверхность пленочных образцов после воздействия лазерного излучения изучалась с помощью оптического микроскопа и интерферометра.

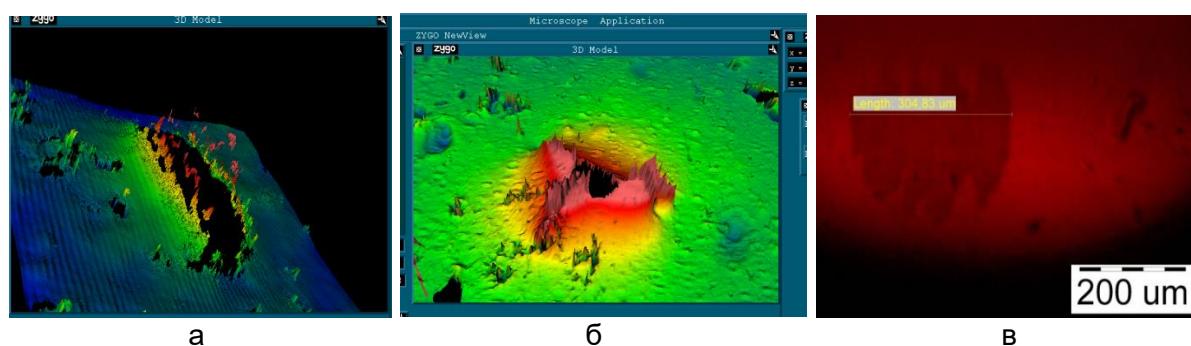


Рис. 2. Поверхность пленочных образцов после воздействия фемтосекундного лазерного излучения изображение оптического пробоя на образце системы 1 с НЧЗ (интерферометр) (а); на образце системы 2 без НЧЗ (интерферометр) (б); на образце системы 1 без НЧЗ (оптический микроскоп) (в)

Результаты исследование нанокомпозитов после воздействия фемтосекундного лазера (Ti:S) представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения плотностей мощности порогов разрушения для пленок из составов 1а, 1а Au (система 1), 2а и 2а Au (система 2, полученные в экспериментах после облучения наносекундным лазером

Состав	Видимые дефекты	Оптический пробой	Размер пятна оптического пробоя, мкм
	Плотность энергии, Дж/см <sup>2</sup>		
1а	$13,34711 \times 10^{-3}$	$13,15808 \times 10^{-3}$	56
1а AU(0,015%)	$12,96904 \times 10^{-3}$	$11,67214 \times 10^{-3}$	51
2а	$13,34711 \times 10^{-3}$	$13,15808 \times 10^{-3}$	47
2а AU(0,015%)	$12,96904 \times 10^{-3}$	$11,67214 \times 10^{-3}$	41

Оптический пробой для большинства нанокомпозитов проявляется при плотности энергии порядка  $0,84 \times 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup> при воздействии на нанокомпозит фемтосекундного лазера с длиной волны 806 нм. Нанокомпозит в этой спектральной области является прозрачным и не проявляет значительного поглощения. Для 2 системы введение НЧЗ уменьшает размер пятна пробоя, а для 1 наблюдается незначительное увеличение.

Результаты исследование нанокомпозитов после воздействия наносекундного лазера SOLAR TII модель LF117 с активной средой алюмо-иттриевый гранат («YAG», Y3Al5O12), легированный ионами неодима (Nd) представлены в табл. 2.

Анализируя данные, полученные при облучении образцов наносекундным лазером (табл. 2), выявлены следующие закономерности:

- порог разрушения нанокомпозитных образцов с НЧЗ соответствует меньшей плотности мощности ( $11,67214 \times 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup>), нежели у образцов без золота ( $11,67214 \times 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup>);
- из выше сказанного следует, что НЧЗ способствуют уменьшению порога разрушения при наносекундном облучении, возможно в следствии дополнительного поглощения излучения на локализованных наночастицах;
- для 2 системы, отличающейся от системы 1 только мономерным составом, размер пятна оптического пробоя меньше на 10 мкм, чем для 1 системы, как для композиции с НЧЗ, так и без.

Обобщая результаты исследования композиций на двух лазерных установках, были сделаны следующие выводы об облучения нанокомпозиций фетосекундным и наносекундным излучением:

- при оптическом пробое образцов наличие НЧЗ, вне зависимости от источника облучения, влияет на размер и форму пятна пробоя в зависимости от состава мономеров. Но следует отметить, что размер пятна меньше, как правило, и наблюдается более сложная геометрическая форма в композициях с НЧЗ;
- при облучении пленок НК наносекундным лазером, порог разрушения образцов с НЧЗ меньше, чем для образцов без НЧЗ. В то время как при фемтосекундном воздействии порог разрушения композиций с НЧЗ и без практически одинаков и составляет  $0,84 \times 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup>, исключение композиция 2а ( $0,83 \times 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup>);
- использованные в исследовании источники излучения работали в импульсном режиме. Результаты исследования свидетельствуют, что при наносекундном излучении размер пятна оптического пробоя меньше, а плотность мощности больше, чем для фемтосекундного. Это обуславливается тем, что источники излучения имеют разную длину волн и частоту излучения. При воздействии наносекундного лазера с более длительным импульсом снижается плотность мощности, требуемая на оптический пробой образца. Возможно, что при данных условиях облучения помимо светового воздействия на материал возникает и термическое, что приводит к уменьшению размера пятна оптического пробоя.

**Заключение.** В работе проведено исследование фотостабильности нанокомпозитных образцов при различных видах облучения (806 нм – фемтосекундное и 1064 нм – наносекундное). Определены критические условия образования оптического пробоя и изменения оптической прозрачности НК. Установлено, что система 2 более устойчива к обоим видам облучения как с НЧЗ, так и без, к воздействию лазерного излучения. При облучении НК наносекундным лазером помимо светового воздействия на материал наблюдается и термическое, выражющееся в снижение плотности мощности, вызывающей оптический пробой образца, и существенном уменьшении размера пятна дефекта.

### Литература

1. Marchenkov N.S., Marchenko N.V. Gold nanoparticles and their application in human diseases theranostics // The National Research Centre «Kurchatov Institute» NBICS-Centre. – 2014. – № 4. – P. 64–77.
2. Ряснянский А.И. и др. Нелинейные оптические свойства наночастиц золота диспергированных в различных оптически прозрачных матрицах // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – № 1. – С. 52–56.
3. Su Y.H. et al. Influence of surface plasmon resonance on the emission intermittency of photoluminescence from gold nano-sea-urchins // Nanoscale. – 2010. – V. 2. – № 12. – P. 2639–2646.
4. Burunkova J. et al. Peculiarities of interaction of gold nanoparticles with photoinitiators in polymer nanocomposites for holographic recording // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. – 2018. – V. 359. – P. 111–120.
5. Zhuk D. et al. Optical recording in functional polymer nanocomposites by multi-beam interference holography // Holography: Advances and Modern Trends V. – International Society for Optics and Photonics, 2017. – V. 10233. – P. 102331Y.
6. Burunkova J. et al. Influence of gold nanoparticles on the photo-polymerization processes and structure in acrylate nanocomposites // European Polymer Journal. – 2015. – V. 64. – P. 189–195.

УДК 535.92

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МАСШТАБНОГО  
КОЭФФИЦИЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА  
НАВИГАЦИОННОГО КЛАССА ТОЧНОСТИ**

**Моторин Е.А.<sup>1</sup>, Алейник А.С.<sup>1</sup>, Кикилич Н.Е.<sup>1</sup>, Виноградов А.А.<sup>1</sup>**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Алейник А.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В данной работе проведено исследование зависимостей масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопа и величины центральной длины волны источника оптического излучения от температуры при использовании фотодиодов с различной спектральной чувствительностью в измерительном тракте волоконного оптического гироскопа навигационного класса точности.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический гироскоп, масштабный коэффициент, температурная стабильность.

**Введение.** Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) уже несколько десятилетий успешно применяются в системах навигации, ориентации и стабилизации. Улучшение технологий изготовления оптических компонентов, а также исследование характеристик и компенсация температурных зависимостей различных блоков ВОГ позволяют достоверно регистрировать угловые скорости на уровне точностей  $0,001^\circ/\text{ч}$ . Дальнейшее повышение точностных характеристик возможно за счет уменьшения и компенсации различных внешних воздействий на узлы ВОГ. Важным параметром ВОГ является его масштабный коэффициент (МК), определяющий точность измерений во всем динамическом диапазоне. Одним из факторов, влияющих на температурную стабильность масштабного коэффициента ВОГ, помимо изменения механических характеристик волоконной катушки и центральной длины волны источника оптического излучения (ИОИ), является температурная зависимость спектральной чувствительности фотоприемника, установленного в измерительном каскаде ВОГ. Целью данного исследования является оценка влияния температурной зависимости спектральной чувствительности фотодиода, установленного в измерительном тракте ВОГ, на МК посредством измерения зависимости температурных коэффициентов МК ВОГ и центральной длины волны ИОИ [1–5].

**Результаты.** Фотография испытательного стенда и схема эксперимента представлены на рис. 1. ВОГ с подключенным к нему суперлюминесцентным волоконным источником оптического излучения (СВИОИ) был закреплен на поворотном стенде, находящемся в термокамере.

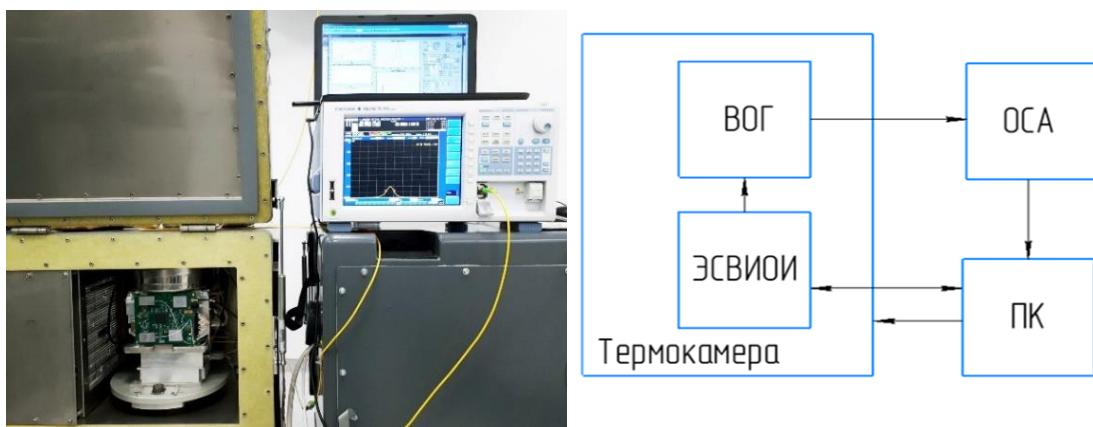


Рис. 1. Фото испытательного стенда для измерения температурной зависимости МК ВОГ

Был исследован вопрос стабильности масштабного коэффициента ВОГ при использовании различных фотодиодов в измерительном каскаде. Спектральная чувствительность фотодиода имеет температурную зависимость, поэтому при изменении температуры наблюдается нестабильность МК ВОГ. Основные характеристики фотодиодов, с которыми проводились измерения, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики фотодиодов

Фотодиод	Темновой ток, нА	Чувствительность, А/Вт	Диапазон спектральной чувствительности, нм
LasersCom «PDI 40»	$10^{-4}$	0,95	1500–1600
Laser Components «IG22-Series»	50	0,9–1,07	1500–1950

Фотодиоды имеют высокое значение чувствительности в диапазоне рабочих длин волн ВОГа, но фотодиод IG22-Series имеет более линейную зависимость спектральной чувствительности от температуры, чем PDI 40. Данная зависимость ухудшается при длинах волн свыше 1950 нм для IG22-Series, и 1600 нм для PDI 40.

Методика измерения состояла в следующем: при каждой температуре (от 0 до 40° с шагом 10°) осуществлялось вращение платформы с определенной скоростью (от ±5°/с до ±45°/с с шагом 10°/с) в течение 2 мин. Далее рассчитывается температурная стабильность масштабного коэффициента во всем диапазоне температур по следующей формуле:

$$MK(T) = \frac{\lambda(T)c}{L(T)D(T)} \cdot \frac{1}{2U_\pi(T)}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина волокна чувствительной катушки;  $D$  – диаметр катушки;  $\lambda$  – центральная длина волны источника излучения;  $U_\pi$  – полуволновое напряжение. Нестабильность измеряемой угловой скорости говорит о нестабильности МК. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения температурного коэффициента МК в зависимости от температуры ВОГ

Диапазон температур	0–10°C	10–20°C	20–30°C	30–40°C	0–40°C
Температурный коэффициент МК, ppm/°C	32,8	27,3	26	20,6	26,4

Далее для каждого фотодиода в измерительном каскаде ВОГ был проведен ряд экспериментов по измерению температурного коэффициента МК. В каждом эксперименте изменяли температурный коэффициент центральной длины волны источника оптического излучения в качестве которого был использован эрбийевый суперлюминесцентный волоконный источник оптического излучения с изменяемым температурным коэффициентом.

Результаты эксперимента по измерению температурного коэффициента МК в зависимости от температурного коэффициента центральной длины волны СВИОИ для приведенных выше фотодиодов приведены на рис. 2.

В идеальном случае должна получиться прямая линия под углом 45°, так как и МК линейно зависит от центральной длины волны источника. Для фотодиода IG22-Series наклон составил 44,93°, в то время как для PDI 40 42, 37°. Соответственно, первый фотодиод ближе к идеальной характеристике и позволяет с большей точностью определять значение МК и детектируемой угловой скорости. Характеристики для данных фотодиодов смешены по оси X на 8 ppm/°C из-за зависимости механических параметров волоконного контура от температуры.

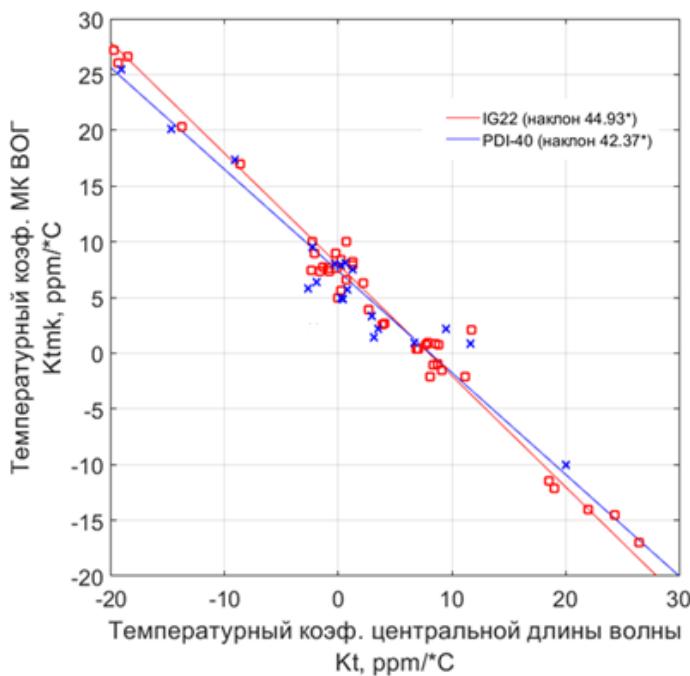


Рис. 2. Зависимость температурного коэффициента МК ВОГ от температурного коэффициента центральной длины волны СВИОИ

**Заключение.** В работе проведено исследование стабильности масштабного коэффициента волоконно-оптическое гироскопа в зависимости от температурной стабильности центральной длины волны источника и спектральной чувствительности фотодиода. Проведена серия экспериментов при различных режимах накачки СВИОИ, с различными температурными коэффициентами. При использовании фотодиода IG-22 с малой температурной чувствительностью в диапазоне длин волн, в котором работает ВОГ, удалось снизить значение температурного коэффициента МК до значения +0,78 ppm/°C.

### Литература

1. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope Second Edition // Artech House. – 2014. – Р. 157–158.
2. Филатов Ю.В. Оптические гироскопы: учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – 139 с.
3. Драницына Е.В. и др. Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 4. – С. 10–20.
4. Шарков И. Исследование и пути компенсации тепловых воздействий на сигнал волоконно-оптического гироскопа НИУ ИТМО: дис. канд. техн. наук. – СПб., 2013.
5. Кикилич Н.Е. Алейник А.С., Виноградов А.В., Востриков Е.В., Петров А.Б., Шарков И.А. Исследование эрбийового суперлюминесцентного волоконного источника оптического излучения в составе волоконно-оптического гироскопа // Сб. тезисов докладов VI Всероссийского конгресса молодых ученых. Электронное издание [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://openbooks.itmo.ru/ru/file/5496/5496.pdf>, своб.

УДК 681.7.026.6

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ  
С ВЫСОКОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ОТКЛОНЕНИЯМ ОПТИЧЕСКОЙ  
ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ, ВХОДЯЩИХ В ЕГО СОСТАВ**

Нго Т.Ф.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Губанова Л.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе представлена методика проектирования интерференционных покрытий с высокой устойчивости к отклонениям оптических толщин слоев, входящих в его состав, в процессе их формирования. Полученная методика позволяет воспроизводить спектральные характеристики интерференционных покрытий с высокой точностью.

**Ключевые слова:** устойчивость, интерференционные покрытия, отклонение оптической толщины, функция качества, спектральные характеристики.

**Введение.** В процессе изготовления интерференционных покрытий всегда наблюдаются отклонения оптических толщин слоев, входящих в их состав [1–6]. Поэтому, экспериментальные спектральные характеристики всегда отличаются от расчетных. Следовательно, в процессе синтеза необходимо определить такиеконструкции интерференционных покрытий, в которых отклонения в слоях, входящих в их состав, будут минимально влиять на спектральные характеристики коэффициента отражения (или пропускания). Кроме того, в процессе изготовления желательно предусмотреть возможность коррекции толщины слоев для получения заданных спектральных характеристики коэффициента отражения (пропускания).

Интерференционные покрытия характеризуются определенными значениями энергетического коэффициента отражения (пропускания) в заданном спектральном диапазоне, возможно, с некоторыми, допустимыми отклонениями. В общем виде спектральная характеристика любого интерференционного покрытия  $R(\lambda)$  должна удовлетворять следующим условиям:  $R(\lambda) < R_1$  в диапазоне  $\lambda_a - \lambda_1$ ;  $R(\lambda) > R_2$  в диапазоне  $\lambda_1 - \lambda_2$ ;  $R(\lambda) < R_3$  в диапазоне  $\lambda_2 - \lambda_3$ ;  $R(\lambda) > R_4$  в диапазоне  $\lambda_3 - \lambda_b$ , где  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – значения энергетического коэффициента отражения, удовлетворяющие техническому заданию;  $\lambda_a - \lambda_b$  – рассматриваемый спектральный диапазон. Для определения конструкции любого типа интерференционного покрытия, используется функции качества, которая может быть определена по формуле [7]:

$$F(X_i) = \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^L |D(X_i, \lambda_j)| \Delta\lambda, \quad (1)$$

где  $\Delta\lambda = (\lambda_a - \lambda_b)/L$ ;

$$D(X_i, \lambda_j) = \begin{cases} 0 \text{ в } [\lambda_a - \lambda_1] \text{ или } [\lambda_2 - \lambda_3] \text{ если } R(X_i, \lambda) \leq R(\lambda) \\ R(\lambda) - R(X_i, \lambda) \text{ в } [\lambda_a - \lambda_1] \text{ или } [\lambda_2 - \lambda_3] \text{ если } R(X_i, \lambda) \geq R(\lambda) \\ 0 \text{ в } [\lambda_1 - \lambda_2] \text{ или } [\lambda_3 - \lambda_b] \text{ если } R(X_i, \lambda) \geq R(\lambda) \\ R(X_i, \lambda) - R(\lambda) \text{ в } [\lambda_1 - \lambda_2] \text{ или } [\lambda_3 - \lambda_b] \text{ если } R(X_i, \lambda) \leq R(\lambda) \end{cases},$$

где  $R(X_i, \lambda)$  – текущие спектральные характеристики коэффициента отражения;  $R(\lambda)$  – технические требуемые спектральные характеристики коэффициента отражения.

Задачей проектирования интерференционных покрытий, спектральные характеристики которого удовлетворяют техническому заданию, является определение параметров конструкции покрытий (количество слоев, оптические толщины слоев, показатели преломления слоев) для получения минимального значения функции качества. Если значение функции качества равно нулю, то спектральные

характеристики определенного покрытия совпадают с требуемыми или их качество лучше, чем требуемое.

Для измерений оптических толщин слоев в процессе их формирования, широко используется фотометрический метод контроля, чаще тот, который использует регистрацию экстремума. Очевидно, что всегда существуют погрешности в регистрации экстремума пропускания, в работе [2] показано, что такая погрешность может составлять величину не более 1%. Основываясь на этой информации, можно определить максимальное отклонения оптической толщины каждого слоя после его изготовления по формуле:

$$\Delta T = T - T' = 4n_{\text{п}}n_i^2 \left( \frac{1}{(n_{\text{п}} + n_i^2)^2} - \frac{1}{(1+n_{\text{п}})^2 n_i^2 \sin^2 \delta + (n_{\text{п}} + n_i^2)^2 \cos^2 \delta} \right), \quad (2)$$

где  $\Delta T \leq 1\%$ ;  $\delta = 2\pi \frac{\Delta(n_i d_i)}{\lambda}$ ;  $n_{\text{п}}, n_i$  – показатели преломления, материалов, из которых изготовлены оптическая деталь и  $i$ -ый слой формирования.

Из формулы (2) видно, что отклонение оптической толщины каждого слоя зависит от показателей преломления материала (рис. 1), формирующего слой, и оптической детали, с использованием которой ведется контроль и погрешности регистрации экстремума.

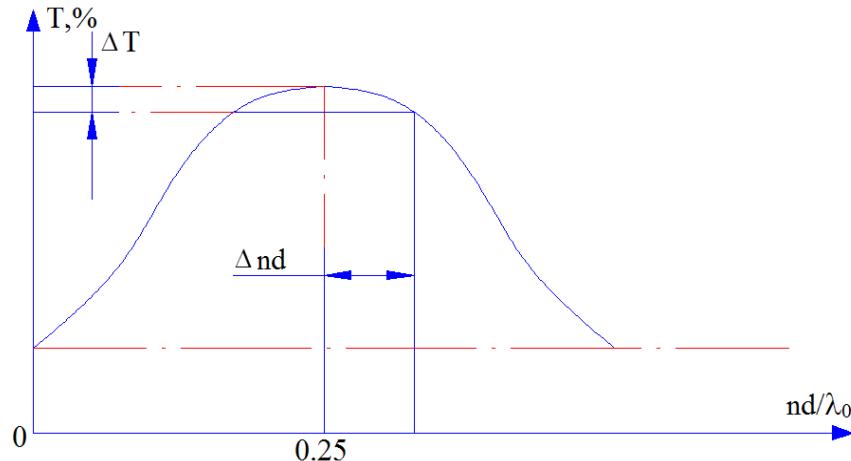


Рис. 1. Зависимость отклонения оптической толщины слоя от погрешности в регистрации экстремума пропускания

Рассмотрим конструкцию интерференционных покрытий вида:

$\Pi M_1 M_2 M_3 \dots M_k$ ,

где  $k$  – количество слоев, ( $1 \leq i \leq k$ );  $M_i$  – материал, из которого формируются слои;  $m_i(\%)$  – максимальное отклонение в оптической толщине  $i$ -ого слоя, которое может быть получено при фотометрическом способе контроля.

Если рассмотреть ситуацию, в которой шаг отклонения в оптической толщине каждого слоя равен  $\beta(\%)$ , то после изготовления получим  $P = \frac{m_1}{\beta} \cdot \frac{m_2}{\beta} \dots \frac{m_k}{\beta} = \frac{1}{\beta^k} \prod_{i=1}^k m_k$  вариантов покрытий конструкции. Далее, из  $P$  вариантов возможных экспериментальных покрытий определим конструкцию (A) путем нахождения максимального значения функции качества. Если спектральные характеристики покрытий (A) удовлетворяют заданным условиям, то спектральные характеристики интерференционных покрытий оказываются устойчивыми к отклонениям в оптических толщинах слоев. Поэтому в процесс синтеза интерференционных покрытий необходимо рассматривать  $P$  вариантов полученной структуры. Если все спектральные

характеристики  $P$  вариантов удовлетворяют заданным требованиям, то структура считается устойчивой.

Далее, возможно корректировать конструкцию покрытия в процессе изготовления путем изменения оптической толщины последующих слоев. В работе [5, 8] представлена методика коррекции оптических толщин слоев. Однако если наблюдается отклонение оптической толщины слоя, находящегося ближе к воздуху, и оно, существенно влияет на спектральные характеристики покрытия (рис. 2, показатель – 1), то корректировка толщины слоев усложняется. Например, если спектральные характеристики коэффициента отражения показываются максимально чувствительными к отклонениям толщины слоя, ограничивающего с воздухом, то не существует слоев для коррекции. Следовательно, полученные характеристики могут не удовлетворять заданным условиям. Поэтому, идеальная конструкция интерференционных покрытий должна иметь максимально чувствительный к отклонению слой вблизи подложки (рис. 2).

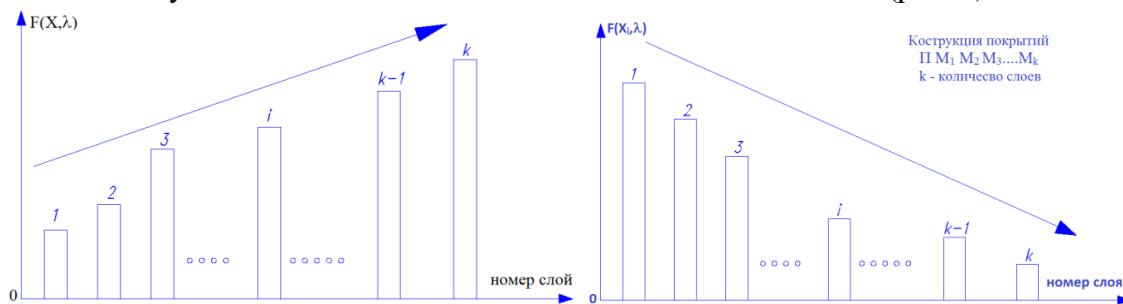


Рис. 2. Сравнение влияния отклонения слоев на спектральные характеристики интерференционных покрытий

При проектировании интерференционных покрытий с высокой устойчивостью к отклонениям оптических толщин, используется алгоритм, который приведен на рис. 3.

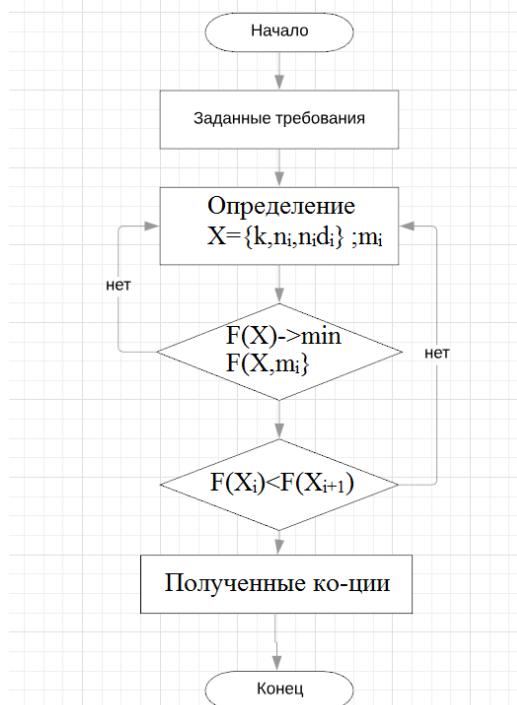


Рис. 3. Схема алгоритма для определения конструкции интерференционных покрытий с высокой устойчивостью к отклонениям толщин слоев

С помощью рассматриваемой методики, получаем конструкцию просветляющего покрытия, у которого спектральные характеристики коэффициента отражения  $R$  удовлетворяют заданном требованиям, например (коэффициент отражения  $R \leq 1\%$  в

диапазоне длины волн 400–750 нм). Полученное просветляющее покрытие имеет следующую конструкцию:

$\Pi\text{SiO}_2\text{YF}_3\ 2\text{HfO}_2\ 0.8\text{MgF}_2\ 0.2\text{SiO}_2$ ,

где  $\Pi$  – подложка изготовлена из оптического стекла марки К8,  $\lambda_0=500$  нм.

Далее, рассмотрим качество спектральных характеристики коэффициента отражения если максимальное отклонение оптической толщины каждого слоя равно  $0,1\lambda_0/4$ .

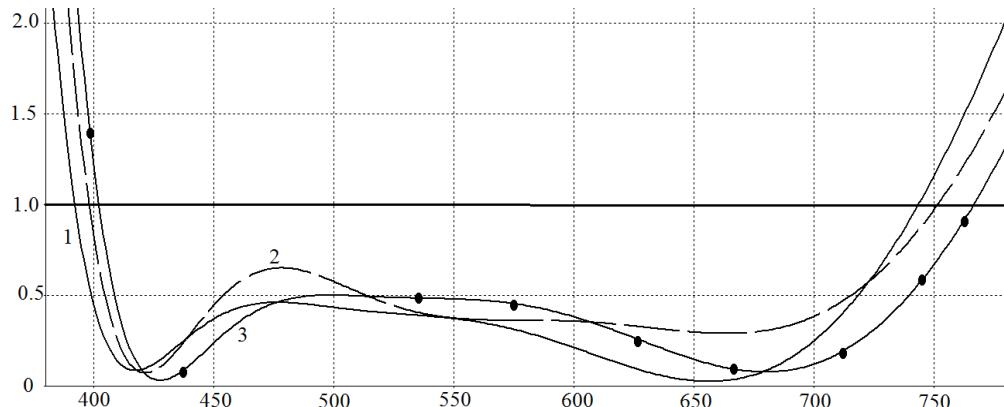


Рис. 4. Спектральные характеристики просветляющего покрытия ( $\Pi$ ). 1 –  $\text{SiO}_2\text{YF}_3\ 2\text{HfO}_2\ 0.8\text{MgF}_2\ 0.2\text{SiO}_2$ ; 2 –  $1.1\text{SiO}_2\ 1.1\text{YF}_3\ 2.1\text{HfO}_2\ 0.85\text{MgF}_2\ 0.25\text{SiO}_2$ ; 3 –  $0.9\text{SiO}_2\ 1.1\text{YF}_3\ 2.1\text{HfO}_2\ 0.7\text{MgF}_2\ 0.3\text{SiO}_2$

Из рис. 4 видно, что спектральные характеристики всех просветляющих покрытий удовлетворяют техническим требованиям при разных отклонениях оптической толщины слоя. Это значит, что синтезированное покрытие оказывается устойчивым к отклонениям толщин слоев.

**Заключение.** В работе представлена методика определения конструкций интерференционных покрытий, которые обладают высокой устойчивостью к отклонениям оптических толщин слоев. Полученные в работе результаты выявили связь просветляющего покрытия, имеющих достаточно устойчивости к отклонения оптических слоев.

## Литература

- Губанова Л.А., Путилин Э.С. Оптические покрытия. Учебник для вузов. – СПб.: Лань, 2016. – 286 с.
- Macleod H.A. Thin-film optical filter. – NY.: McGraw, 2010. – 772 с.
- Dobrowolski J.A. Optical properties of films and coating. V. 1. – NY.: McGraw, 1995. – С. 42.
- Котликов Е.Н., Тропин А.Н. Критерий устойчивости спектральных характеристик многослойных интерференционных покрытий // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 3. – С. 60–64.
- Котликов Е.Н. и др. Анализ устойчивости спектральных характеристик многослойных оптических покрытий // Оптика и спектроскопия. – 2011. – Т. 111. – № 3. – С. 515–520.
- Нго Ф.Т. и др. Определение слоя, входящего в состав интерференционного покрытия, максимально влияющего на соответствие спектральной характеристики коэффициента отражения изготовленного покрытия синтезированному // Оптический журнал – 2018. – Т. 85. – № 3. – С. 72–76.
- Фи Н.Т., Губанова Л.А., Хоа Ф.В. Повышение устойчивости спектральных характеристик интерференционных покрытий к отклонению в параметрах слоев, входящих в их состав // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125. – № 2. – С. 284–288.

УДК 681.786.42

## АНАЛИЗ ПРИНИМАЕМЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ДЫМКИ И ТУМАНА ПРИ ПОСАДКЕ ВЕРТОЛЕТОВ

Нгуен В.Ч.<sup>1</sup>, Нгуен Д.Т.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Лебедько Е.Г.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе анализируются принимаемые сигналы в условиях чистой атмосферы, дымки и тумана. Рассматриваются методы определения угла наклона посадочной поверхности в сложных метеоусловиях.

**Ключевые слова:** туман, дымка, посадка вертолетов, угол наклона поверхностей.

При посадке вертолетов на неподготовленные площадки в сложных метеоусловиях возникает вероятность аварийной ситуации. Одна из основных причин заключается в том, что пилот не обладает достаточные информации о пространственном положении вертолета относительно посадочной поверхности. При углах наклона поверхности больше  $15^\circ$  можно считать критической для посадки вертолетов. Рассмотрим определение угла наклона дифференциальными амплитудными и временными методами [1–4].

При временном методе отраженный сигнал определяется зависимостью

$$S_2(t) = \int_{t_1}^{t_2} S_1(t) g_s(t-\tau) d\tau, \quad (1)$$

$$\text{где } g_s(t) = \iint_D r(\gamma) \cos(\gamma) \delta\left[t - \frac{2z(x, y)}{c}\right] dx dy, \quad (2)$$

отражательная импульсная характеристика облучаемой поверхности;  $c$  – скорость света;  $\gamma$  – угол между нормалью к элементу поверхности и направлением наблюдения;  $z(x, y)$  – уравнение поверхности;  $\delta(\gamma)$  – дельта-функция;  $r(\gamma)$  – коэффициент яркости поверхности.

В случае плоской наклонной поверхности при равномерном поле излучения, отражательная импульсная характеристика определяется выражением:

$$g_s(t) = \rho A \sqrt{t\tau_i - t^2}, \quad (3)$$

где  $\tau_i = 2h_i/c$ ;  $h_i$  – радиальная протяженность облучаемой поверхности.

Будем исходить из следующих исходных предположений (рис. 1):

$C=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ;  $L=50 \text{ м}$  (расстояние от вертолета до поверхности);  $2\beta=15$  мин и 25 мин.

Угол  $\psi=60^\circ$ . Угол наклона  $\phi=0 \div 90^\circ$ .

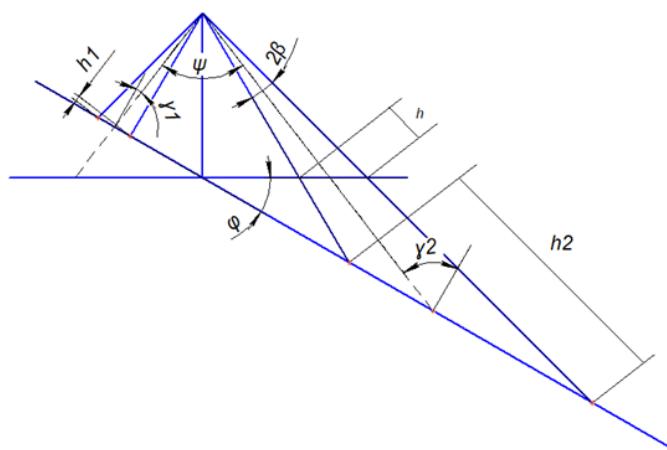


Рис. 1. Схемы для определения угла наклона поверхности

Используя приведенные соотношения при зондирующем косинусным импульсе  $S_1(t)$ , были определены отражательные импульсные характеристики различных поверхностей. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены отраженные сигналы от двух диаметрально расположенных поверхностей, нормированных по максимальному из них.

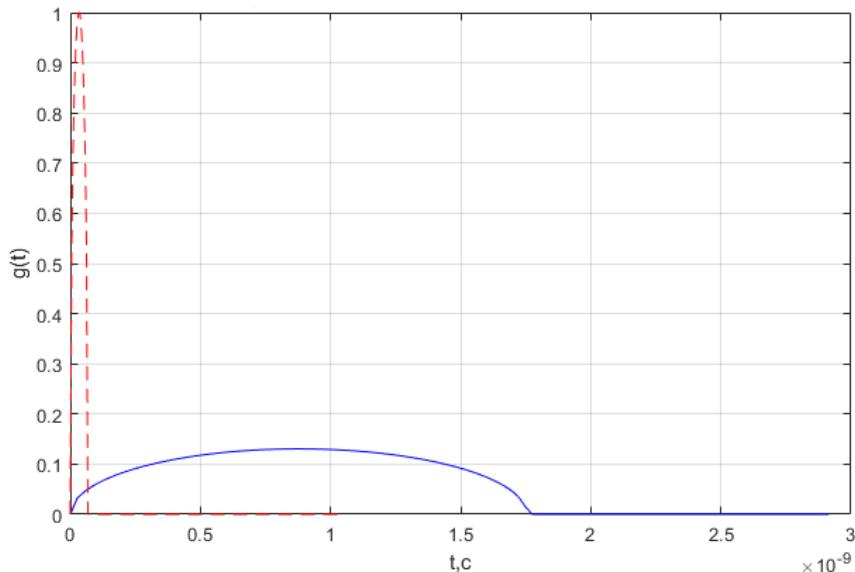


Рис. 2. Отражательные импульсные характеристики поверхностей при  $\psi=60^\circ$ ,  $2\beta=15'$

В условиях тумана и дымки возникает помеха обратного рассеяния, импульсная характеристика которой определяется зависимостью:

$$g_{\text{д}}(t) = \frac{K_0 \sigma \phi}{ct^2} \exp(-\varepsilon_1 ct). \quad (4)$$

Помеха обратного рассеяния будет определяться интегральной сверткой излучаемого сигнала и импульсной характеристики обратного рассеяния.

При дифференциальном временном методе величина разностного временного интервала принимаемых сигналов будет пропорциональна углу наклона посадочной поверхности. При этом помеха обратного рассеяния автоматический будет компенсироваться. На рис. 3 приведена зависимость разностного временного интервала от угла наклона облучаемой поверхности. Рис. 4 поясняет получение разностного сигнала в условиях чистой атмосферы (рис. 4, а) и при наличии тумана (рис. 4, б).

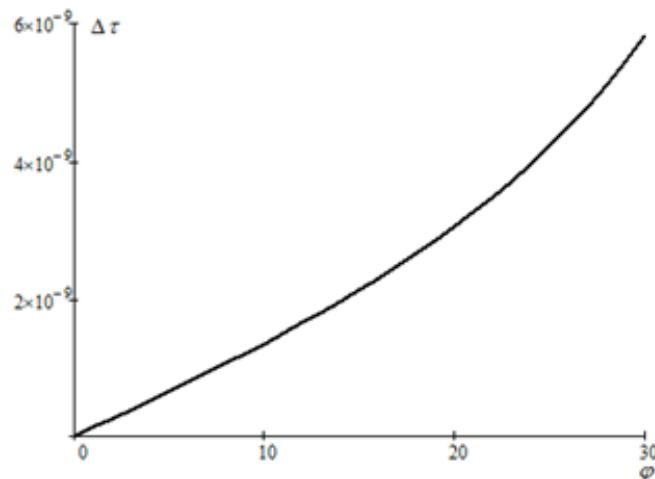


Рис. 3. Зависимости разностного временного интервала от угла наклона

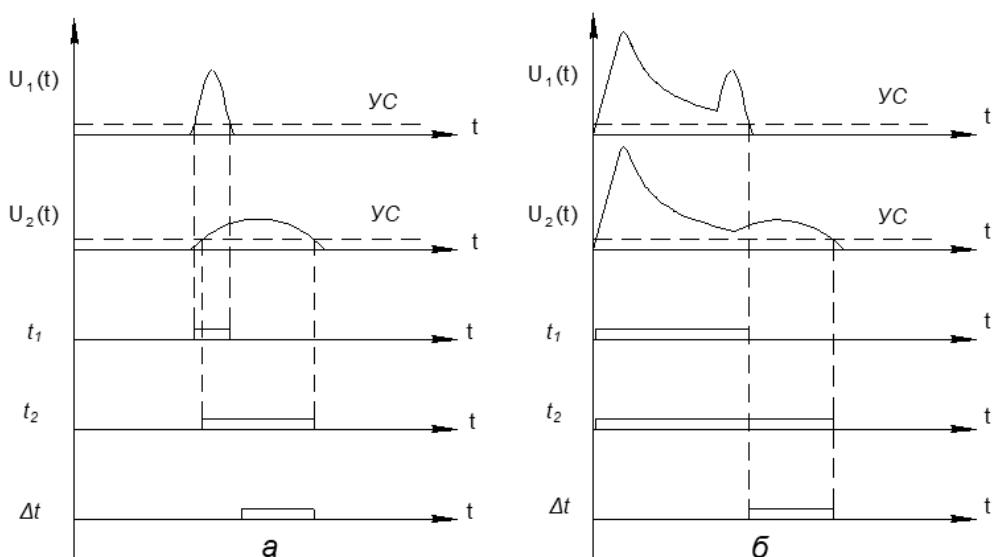


Рис. 4. Временные диаграммы в условии чистой атмосферы (а) и слабого тумана (б) при  $\psi=60^\circ$  и угол наклона  $\phi=25^\circ$  (УС – уровень срабатывания)

При амплитудном методе помеха обратного рассеяния также будет автоматически уничтожаться дифференциальной схемой. В качестве иллюстрации на рис. 5, а и б приведены принимаемые сигналы и их разность при заметном тумане (МДВ – 0,5 км) и дымке (МДВ – 2 км) и одинаковых коэффициентов отражения поверхностей.

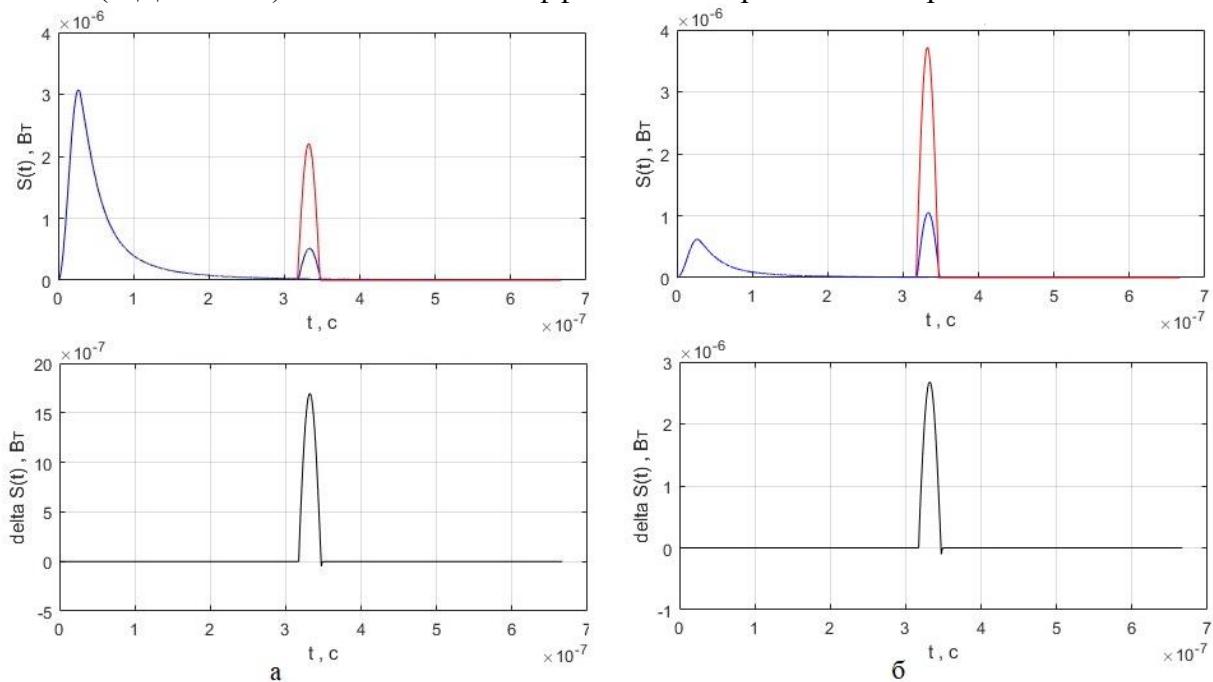


Рис. 5. Принимаемые сигналы и их разность при заметного тумана (а) и сильной дымки (б)

Следует отметить, при амплитудном методе возникает опасность возникновения существенной погрешности, обусловленной возможностью появления поверхностей в смежных каналах с различными коэффициентами отражения. Естественно, такая погрешность исключается во временном методе определении угла наклона посадочной поверхности.

На рис. 6 одна из возможных структурных схемы, реализующая предложенный временной метод.

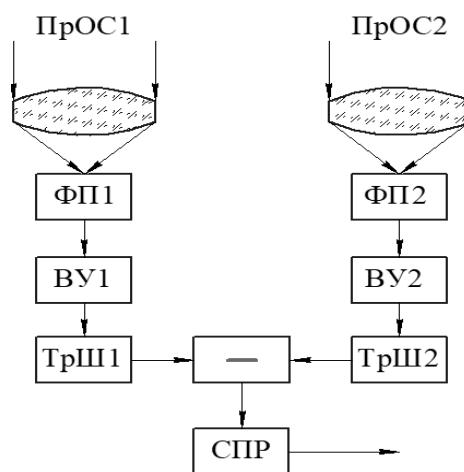


Рис. 6. Структурная схема импульсного оптико-электронного анализатора структуры поверхности: ПрОС – приемная оптическая система; ФП – фотоприемник; ВУ – видеоусилитель; ТрШ – триггер Шмидта; СПР – схема пропорционального расширения временного интервала

Схема пропорционального расширения временного интервала позволяет существенно расширить разностный временной интервал и оцифровать его.

Проведенный анализ показал, что в условиях тумана и дымки использование дифференциальных методов определения угла наклона посадочной поверхности помеха обратного рассеяния не представляет угрозы для приведенной высоты принятия решения о посадке. Можно предположить, что аналогичная ситуация будет иметь место и для случая, при котором туман возвышается над землей на 7–15 м.

### Литература

1. Лебедько Е.Г. Системы импульсной оптической локации. – СПб.: Лань, 2014. – 368 с.
2. Лебедько Е.Г., Порфириев Л.Ф., Хайтун Ф.И. Теория и расчет импульсных и цифровых оптико-электронных систем. – Л.: Машиностроение, 1984. – 191 с.
3. Козлов В.П., Федорова Е.О. Отражение света от рассеивающей среды // ОМП. – 1967. – № 1. – С. 1–7.
4. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М. Основы импульсной и лазерной локации: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 512 с.

УДК 535:631.373

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ВСЕПОГОДНОГО  
ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫСОТОМЕРА МАЛЫХ ВЫСОТ  
НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Нгуен Д.Т.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.т.н., профессор Лебедев Е.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В данной работе рассмотрена возможность создания всепогодных импульсных лазерных высотометров для измерения малых высот над морской поверхностью, и также приведена оценка влияния расширения полосы пропускания приемно-усилительного тракта как на потенциальную точность измерения. Предложен новый метод измерения высоты до морской поверхности в условиях тумана и дымки. Предложена структурная схема всепогодного импульсного лазерного высотометра. Определены диапазоны измеряемых высот в чистой атмосфере и в условиях тумана и дымки.

**Ключевые слова:** морская поверхность, высотомер малых высот, импульсная характеристика обратного рассеяния атмосферы, фиксация сигнала по спаду, всепогодный импульсный лазерный высотометр.

**Введение.** Применение импульсных лазерных высотометров малых высот над морской поверхностью сопряжено с низкой вероятностью приема отраженных сигналов от морской поверхности в силу того, что отражающая поверхность представляется собой множество элементарных зеркальных отражателей, случайно ориентированных в пространстве. При этом коэффициент отражения этих элементарных отражателей к нормальному падению излучения составляет величину 0,02–0,04. Естественно, что для надежной фиксации отраженного сигнала в таких условиях потребуется порядка 100 зондирований морской поверхности [1].

В условиях тумана над морской поверхностью считается использование лазерных высотометров невозможным. Однако при тумане возникает достаточно большая по величине помеха обратного рассеяния, которая обрывается по времени, соответствующем расстоянию до морской поверхности. В этом случае можно определить высоту до морской поверхности при каждом зондирующем импульсе, фиксируя временное положение спада сигнала обратного рассеяния.

Задача заключается в исследовании возможности создания всепогодного импульсного лазерного высотометра малых высот до морской поверхности и определения диапазона измеряемых высот в условиях тумана, дымки и чистой атмосферы. При этом основной задачей является исследование возможности измерения высоты в условиях тумана и дымки.

**Модель исследования.** Рассмотрим временную структуру помехи обратного рассеяния и среднюю мощность отраженного сигнала от морской поверхности.

Временную функцию помехи обратного рассеяния  $P(t)$  определим по формуле [2]

$$P(t) = \int_0^t g(\tau) S_1(t - \tau) d\tau,$$

где  $S_1(t)$  – зондирующий импульс, в качестве которого использован косинусоидальный импульс

$$S_1(t) = \begin{cases} \Phi_u \cos \frac{\pi t}{\tau} & \text{при } t < \frac{\tau}{2}, \\ 0 & \text{при } t > \frac{\tau}{2} \end{cases}$$

где  $\Phi_i$  – мощность излучения;  $\tau$  – длительность зондирующего импульса на уровне 0,5 от максимального значения;  $g(t)$  – импульсная характеристика помехи обратного рассеяния атмосферы

$$g(t) = \frac{k_0 \sigma_\mu \Phi_\pi}{ct^2} \exp\{-\varepsilon ct\}, \quad (1)$$

$$g(t) = \frac{4\sigma_\mu \Phi_\pi \exp\{-\varepsilon ct\}}{\pi ct^2} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{t_0}{t} - \frac{t_0}{t} \sqrt{1 - \left( \frac{t_0}{t} \right)^2} \right], \quad (2)$$

где  $\sigma_\mu$  – показатель рассеяния атмосферы;  $\varepsilon$  – показатель ослабления атмосферы;  $k_0$  – коэффициент, зависящий от характеристик полей излучения и приема;  $t_0$  – время, соответствующее дистанции от приемного объекта до пересечения полей излучения и приема;  $c$  – скорость света;  $\Phi_\pi$  – среднее значение индикаторы рассеяния в направлении назад.

Экспериментально подтвержденные в работах [2–4] соотношения (1) и (2) описывают импульсные характеристики обратного рассеяния атмосферы для коаксиальной приемно-передающей системы и бистатической схемы соответственно.

Для чистой атмосферы  $\Phi_\pi=0,93$  (по нормировке индикаторы Фесенковой) [5].

В случае дымки и тумана используем функцию Хэни–Гринстейна для описания индикаторы рассеяния аэрозольной атмосферы [6]

$$\varphi(\gamma) = \frac{1 - g^2}{\left(1 + g^2 - 2 \cdot g \cdot \cos(\gamma)\right)^{\frac{3}{2}}}, \quad \Phi_\pi = \varphi(\pi),$$

где  $0 \leq g < 1$  – несимметричный параметр индикаторы: чем он больше, тем сильнее вытянется вперед индикатора. Для сильной дымки  $0,7 \leq g < 0,8$ , слабого и среднего тумана  $0,8 \leq g < 0,85$ , сильного тумана  $0,85 \leq g < 0,9$ , дождей и снега  $0,9 \leq g < 1,0$ .

Показатель рассеяния атмосферы определялся по формуле

$$\sigma_\mu = \frac{3,912}{L_M} \left( \frac{0,55}{\lambda} \right)^q, \quad q = 0,585 \sqrt[3]{L_M},$$

где  $L_M$  – метеорологическая дальность видимости (МДВ);  $\lambda$  – длина волны излучения.

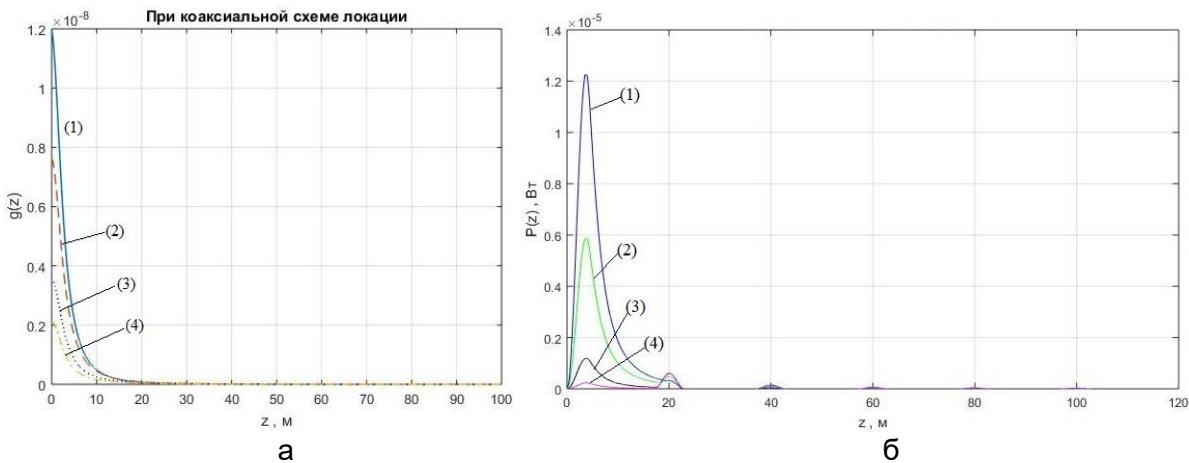


Рис. 1. Импульсная характеристика обратного рассеяния атмосферы при коаксиальной схеме локации в условиях: 1 – очень сильного тумана; 2 – сильного тумана; 3 – среднего тумана; 4 – слабого тумана (а); временная характеристика сигнала обратного рассеяния и возможные отраженные сигналы от морской поверхности при условиях: 1 – сильного тумана (МДВ=0,2 км); 2 – среднего тумана (МДВ=0,5 км); 3 – сильной дымки (МДВ=4,0 км); 4 – хорошей видимости (МДВ=30,0 км) (б)

На рис. 1, а приведены соответственно импульсные характеристики помехи обратного рассеяния при коаксиальной приемно-передающих оптических систем для различных состояний атмосферы.

На рис. 1, б приведены временные характеристики помех обратного рассеяния при мощности зондирующего импульса 50 Вт. На рисунке в качестве иллюстрации для высоты 20 м показано, что временная функция помехи обратного рассеяния обрывается в следствие низкого коэффициента отражения поверхности. Большая часть излучения уходит в воду. При этом рассеяние излучения в водной среде дает сигнал существенно ниже порогового даже при чистой атмосфере [7]. Характерно это явление и на других высотах.

Таким образом фиксация временного положения спада помехи обратного рассеяния позволяет осуществлять контакт с водой поверхности в сложных метеоусловиях при каждом зондирующем импульсе. В этом случае временной интервал между моментами фиксации временного положения спада импульса излучения (зондирующего) и спада помехи обратного рассеяния будет соответствовать измеряемой высоте.

При рассмотрении точности измерений основными погрешностями являются шумовая, динамическая и методическая. Первая погрешность обусловлена сдвигом отсчетной точки под действием шума, вторая – изменением величины сигнала и крутизны спада его и третья методом измерения временного интервала.

Так как помехи обратного рассеяния определяется состоянием атмосферы и мощностью излучаемого сигнала, то при заданной плотности тумана или дымки динамической погрешностью можно пренебречь за исключением измерений на максимальных дистанциях.

При построении импульсных лазерных высотомеров используются в качестве фотоприемника фотодиоды или лавинные фотодиоды. В первом случае при простоте построения электрической схемы и температурной стабилизации необходимо учитывать инерционность входной цепи и связанные с этим энергетические и точностные потери, а при использовании лавинных фотодиодов с использованием дополнительных схем стабилизации можно рассматривать прием сигналов как безынерционный.

При безынерционном приеме дисперсия оценки временного положения сигнала при его фиксации по спаду определяемая из уравнения [8]

$$m_1 \{Y(t_0)\} + (t - t_0^*) \frac{dm_1 \{Y(t_0)\}}{dt} + Y^0(t_0) = Y_n, \quad (3)$$

где  $m_1 \{Y(t_0)\}$  – математическое ожидание функции оптимального выходного эффекта;  $Y^0(t_0)$  – отклонение функции от математического ожидания;  $Y_n$  – уровень фиксации.

Исходя из условия несмешенной оценки, дисперсия ее при фиксации по спаду в соответствие с (3) будет определяться зависимостью

$$\sigma_\phi^2 = - \frac{\frac{G}{2\pi} \int_0^\infty |S(j\omega)|^2 d\omega}{\left[ \frac{j}{\pi} \int_0^\infty \omega |S(j\omega)|^2 d\omega \right]^2}. \quad (4)$$

Воспользуемся гауссовой спектральной функцией  $S(j\omega)$  принимаемого сигнала, учитывая, что форма сигнала заданной энергии и величины незначительно влияет на условия обнаружения и погрешность оценки времени запаздывания [9]. При этом нас

будет интересовать зависимость дисперсии ошибки при масштабном изменении ширины полосы пропускания приемно-усилительного тракта. Тогда из (7) получим

$$\sigma_{\phi}^2 = \frac{\sigma_{\text{ш}}^2 \tau^2 (1+n^2)}{a^2 8\sqrt{2}\pi n}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{ш}}^2 = \frac{G}{\tau}$  – дисперсия шумов на выходе приемно-усилительного тракта;  $a$  – величина сигнала;  $\tau$  – длительность сигнала;  $n$  – масштабный коэффициент изменения ширины полосы пропускания ( $n < 1$  – расширение полосы пропускания).

При этом минимальная дисперсия погрешности фиксации по спаду сигнала будет иметь место при расширении полосы пропускания приемно-усилительного тракта 1,73 раза. В этом случае средняя квадратичная погрешность фиксации, тем не менее, будет в 1,12 раза выше по отношению к оптимальной (оценка по максимуму правдоподобия). При этом энергетические потери не превысят 10%.

Среднюю квадратичную погрешность фиксации по спаду сигнала в условиях инерционного приема для оптимальной фильтрации можно представить соотношением

$$\sigma_{\phi}(T) = \left\{ \frac{1,25v^2\tau G_1(1+m)}{2\pi a^2 \sqrt{2} \left[ 1 - \sqrt{\pi} H\left(\frac{1}{v}\right) \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Расчеты по формуле (6) показывают, что в условиях оптимальной фильтрации средняя квадратичная погрешность фиксации временного положения по спаду сигнала при инерционном приеме для  $v$  равных 0,5 и 2,0 будет соответственно больше, чем при безынерционном приеме в 1,3 и 2,5 раза. При расширении полосы пропускания в 1,73 раза следует ожидать несмотря на увеличение крутизны спада более существенный рост погрешности из-за подъема энергетического спектра шума. Естественно, в этом случае нет необходимости расширять полосу пропускания, при которой может уменьшиться погрешность измерения.

**Всепогодный импульсный лазерный высотомер.** На основании изложенного предлагается для измерения малых высот над морской поверхностью при любых метеорологических условиях структурная схема всепогодного импульсного лазерного высотометра, приведенная на рис. 2.

На рис. 3 приведены временные диаграммы, поясняющие работу высотометра. На графике обозначаются УС – уровень срабатывания;  $T_u$  – временный интервал, соответствующий измеряемой высоте. Цифрами в кружках «1»–«6» указаны напряжения сигналов, соответствующие позициям цифр на структурной схеме рис. 2 в условиях чистой атмосферы, «4'»–«6'» – напряжения сигналов при наличии дымки или тумана.

Работа высотометра в условиях чистой атмосферы осуществляется как в обычном импульсном лазерном дальномере при открытых схемах САС и закрытых схемах СС по фронтам импульсов, снимаемых с триггеров Шмитта в опорном и приемных каналах. В этом режиме работы при отсутствии принимаемого сигнала вследствие случайной поверхности моря счетчик дистанции измерительного устройства переполняется, срабатывает триггер переполнения Тр.П, запускается схема обнуления счетчика и триггера измерительного устройства. В этом случае потребителю с СхСИ не снимается информация о высоте.

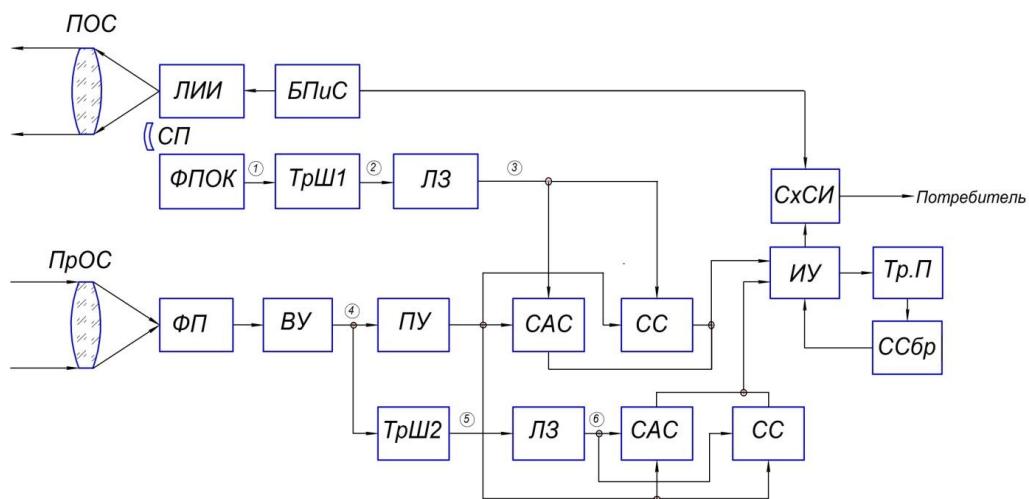


Рис. 2. Структурная схема всепогодного импульсного лазерного высотомера:  
ПОС – передающая оптическая система; ЛИИ – лазерный источник импульсного излучения; БПиС – блок питания и синхронизации; СП – светопровод;  
ФПОК – фотоприемник опорного канала; ТрШ – триггер Шmittта (схема фиксации фронта и спада сигнала); ЛЗ – линия задержки на короткий промежуток времени  $\tau_3$ ;  
ПрОС – приемная оптическая система; ФП – фотоприемник; ВУ – видеоусилитель;  
ПУ – пороговое устройство, уровень срабатывания которого соответствует величине помехи обратного рассеяния при слабой дымке; СС – схема совпадения; САС – схема антисовпадения; ИУ – измерительное устройство; Тр.П – триггер переполнения счетчика дистанции; ССбр – схема обнуления счетчика и триггера измерительного устройства; СхСИ – схема съема информации

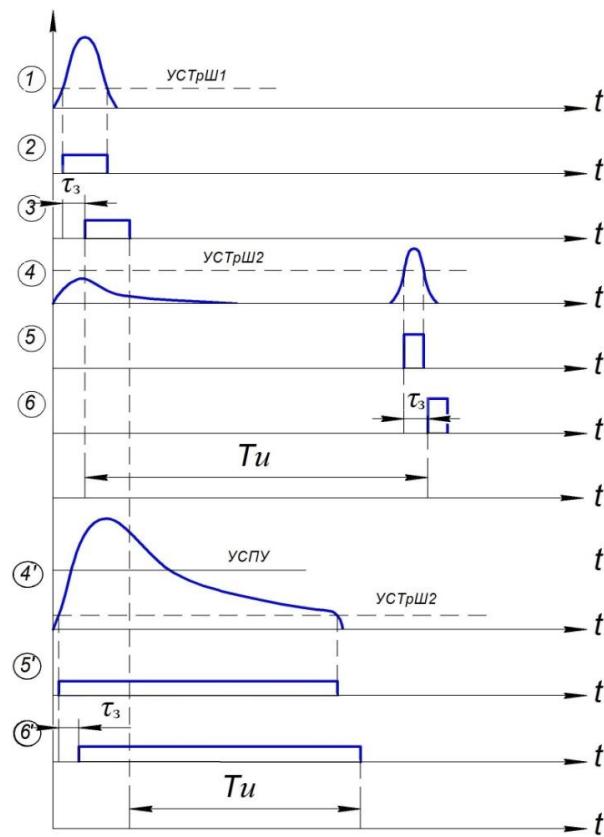


Рис. 3. Временные диаграммы работы высотомера

При наличии дымки или тумана величина помехи обратного рассеяния, которая превышает уровень срабатывания порогового устройства ПУ, закрываются САС и

открываются СС и измерение высоты осуществляется по временному интервалу, сформированного спадом сигнала с ТрШ1 опорного канала и спадом импульса с ТрШ2, соответствующего спаду помехи обратного рассеяния. Линии задержки с одинаковым временем задержки устанавливаются для предотвращения срабатывания по фронту помехи обратного рассеяния, так как уровень срабатывания ТрШ2 меньше уровня срабатывания ПУ.

**Заключение.** В настоящей работе проведенный анализ измерения малых высот импульсным лазерным высотометром до морской поверхности показал возможность измерения дистанции до поверхности моря в условиях тумана и дымки вследствие спада помехи обратного рассеяния в момент достижения излучения морской поверхности из-за низкого коэффициента отражения поверхности. При этом если при излучаемом импульсе мощностью 50 Вт диапазон измерения в чистой атмосфере составляет от 5 до 100 м, то в условиях тумана и дымки он ограничивается высотой 50–70 м.

Предлагается структурная схема всепогодного импульсного лазерного высотометра малых высот до морской поверхности, обеспечивающая измерение дистанции как в чистой атмосфере, так и в условиях дымки и тумана. При этом использование лазерного высотометра в сложных метеоусловиях позволяет не только постоянно осуществлять контакт с водой, но и уверенную работу в условиях радиопомех.

### Литература

1. Дык Н.Т., Ван Н.Ч., Лебедько Е.Г. Особенности проектирования бортового импульсного лазерного высотометра до морской поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 9. – С. 745–750.
2. Лебедько Е.Г. Системы импульсной оптической локации. Учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2014. – 368 с.
3. Козлов В.П., Федорова Е.О. Отражение света от рассеивающей среды // ОМП. – 1967. – № 1. – С. 1–7.
4. Скрепин А.Л., Иванов А.П., Калинин И.И. Пространственно-временная структура световой дымки от импульсного излучателя в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1970. – Т. 6. – № 9. – С. 889–899.
5. Волохатюк В.А., Кочетков В.М., Красовский Р.Р. Вопросы оптической локации / Под ред. Р.Р. Красовского. – М.: Советское радио, 1971. – 256 с.
6. Henyey L.G., Greenstein J.L. Diffuse radiation in the galaxy // The Astrophysical Journal. – 1941. – V. 93. – P. 70–83.
7. Лебедько Е.Г., Покровский Ю.П., Порфириев Л.Ф., Симовский Р.А., Иванов В.И. Вероятностные характеристики отражения импульсных сигналов от взволнованной водной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. – 1976. – Т. 19. – № 6. – С. 109–113.
8. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигналов // Сов. радио. – 1970. – С. 334.
9. Лебедько Е.Г., Порфириев Л.Ф., Хайтун Ф.И. Теория и расчет импульсных и цифровых оптико-электронных систем. – Л.: Машиностроение, 1984. – 192 с.

УДК 535.317

**РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА С ДИСКРЕТНОЙ СМЕНОЙ УВЕЛИЧЕНИЯ**

Нгуен Н.Ш.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н., доцент Романова Г.Э.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В данной работе рассмотрены результаты анализа четырехкомпонентной системы для ИК области спектра с дискретной сменой увеличения. Показаны результаты аберрационного анализа различных вариантов оптических систем.

**Ключевые слова:** объектив для ИК области, дискретная смена увеличения, аберрации.

**Введение.** Системы с переменным фокусным расстоянием представляют собой оптические системы с несколькими подвижными оптическими элементами для изменения основных характеристик (фокусного расстояния, линейного увеличения и др.). Наиболее широко используется в кинематографе, микроскопии, астрономических приборах, телевидении и фотографии, а также в ИК технике.

Объективы с переменным фокусным расстоянием, входящие в состав панклатических систем решают два основные задачи:

1. поиск наблюдаемого объекта и его введение в поле системы. Для этого используется большое поле (соответственно малое фокусное расстояние);
2. детальное наблюдение объекта при большем масштабе изображения. В этом случае система имеет значительное увеличение или большое фокусное расстояние, но при этом при больших увеличениях поле системы уменьшается [1–3].

**Анализ вариантов оптических схем.** Предварительный габаритный расчет, позволяющий найти оптимальные для исходных данных параметры компонентов (фокусные расстояния, расстояния между компонентами) был выполнен на предыдущем этапе работы. Характеристики системы: фокусное расстояние  $f'_{\max} = -40$  мм,  $f'_{\min} = -120$  мм, система работает с неохлаждаемым приемником (размер диагонали  $2y' = 12,3$  мм).

В данной работе были рассмотрены оптические системы четырехкомпонентной схемы при разном количестве линз для различных относительных отверстий, полученные с использованием возможностей автоматизированной коррекции в программе Zemax. Параметры оптимизации – радиусы, толщины линз, расстояния между компонентами и различные варианты положения асферической поверхности в системе.

Результаты оптимизации показаны ниже.

1. Система при относительном отверстии 1:  $k=1:3,5$ . Система содержит 6 линз, выполненных из герmania. При фокусном расстоянии  $f' = -120$  мм:  $d_2 = 105$  мм,  $d_8 = 35$  мм,  $d_{10} = 44$  мм, длина системы  $L = 215,5$  мм; при фокусном расстоянии  $f' = -40$  мм:  $d_2 = 74,518$  мм,  $d_8 = 75$  мм,  $d_{10} = 46,472$  мм, длина системы  $L = 227,5$  мм.
2. На рис. 1–3 показаны результаты оптимизации четырехкомпонентной системы при асферизации четвертой поверхности. Из графиков функции передачи модуляции видно, что качество изображение практически близко к дифракционному пределу.

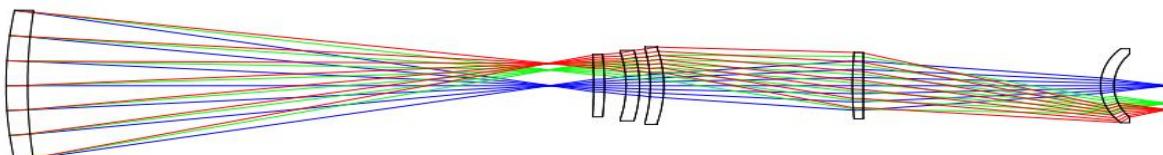
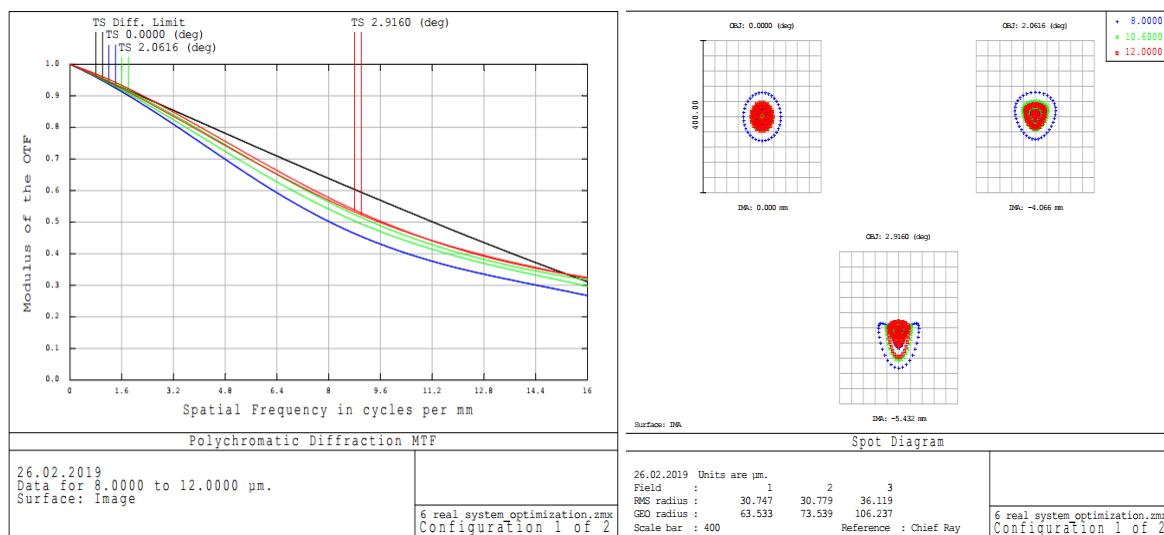
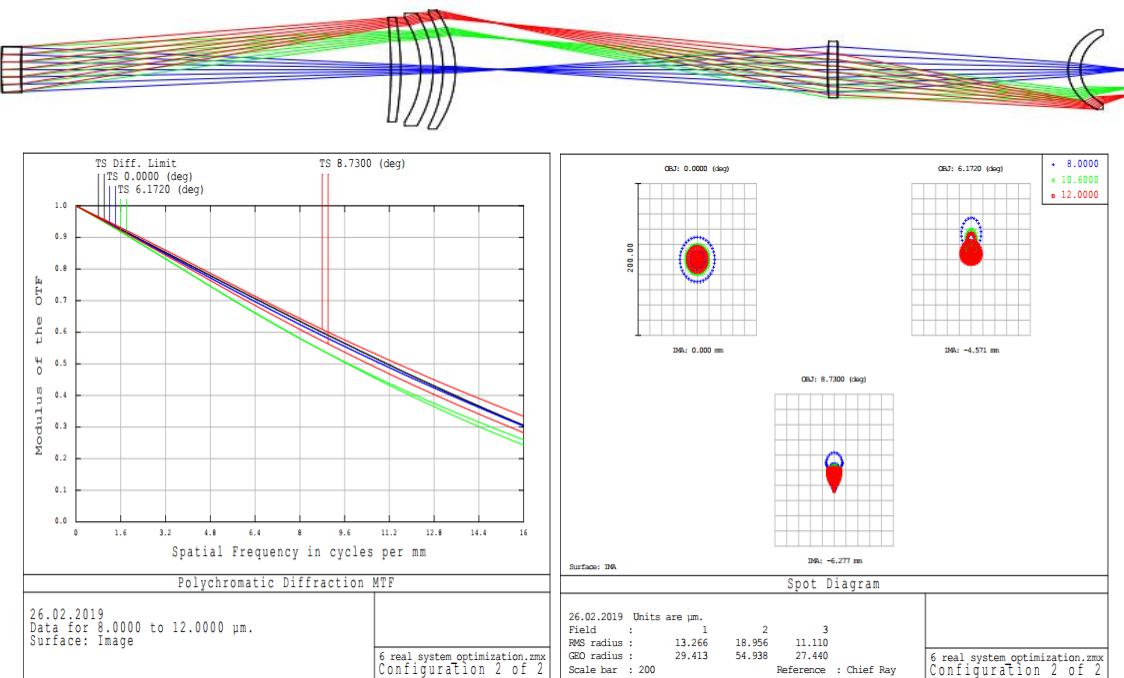


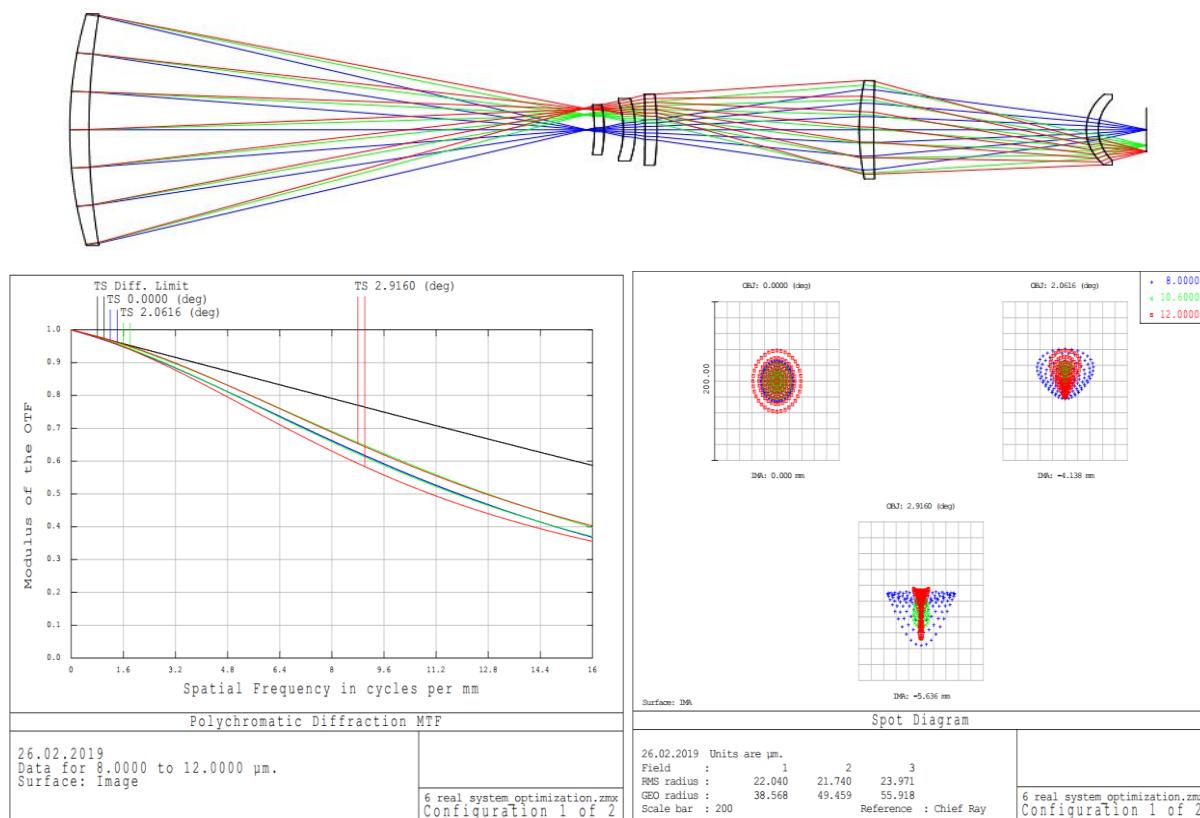
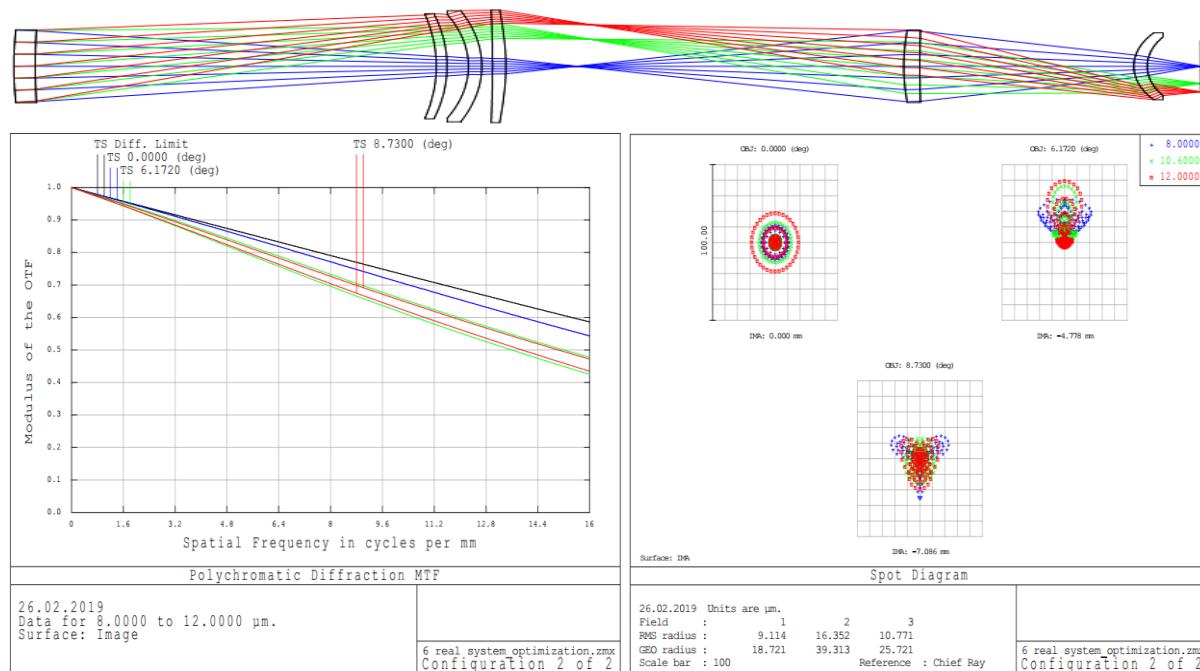
Рис. 1. Схема четырехкомпонентной системы  $f' = -120$  мм,  $1:3,5$ ,  $2w = 5,84^\circ$

Рис. 2. Характеристики четырехкомпонентной системы  $f'=-120$  мм, 1:3,5,  $2w=5,84^\circ$ Рис. 3. Четырехкомпонентная система  $f'=-40$  мм, 1:3,5,  $2w=17,46^\circ$ : схема (а); функция передачи модуляции и вид пятен рассеяния для трех точек поля (б)

Как видно из графиков, при необходимости иметь больший коэффициент передачи контраста для данного приемника (шаг пикселей в рассматриваемом случае составляет 30 мкм), необходимо использовать большее относительное отверстие.

3. Система при большем относительном отверстие  $1:k=1:2$ . На рис. 4 и 5 показаны результаты оптимизации четырехкомпонентной системы при асферизации первой, шестой и восьмой поверхности. По графику функции передачи модуляции видно, что качество изображения, хотя и не достигает дифракционно-ограниченного, но обеспечивается более высокий коэффициент передачи контраста, чем в предыдущем случае.

Система также содержит 6 линз, выполненных из германия. При фокусном расстоянии  $f'=-120$  мм длина системы составляет  $L=223,7$  мм; при фокусном расстоянии  $f'=-40$  мм:  $d_2=74,518$  мм,  $d_8=75$  мм,  $d_{10}=46,472$  мм, длина системы  $L=221,8$  мм.

Рис. 4. Схема и характеристики четырехкомпонентной системы  $f'=-120$  мм, 1:2,  $2w=5.84^\circ$ Рис. 5. Схема и характеристики четырехкомпонентной системы  $f'=-40$  мм, 1:2,  $2w=17.46^\circ$ 

**Заключение.** В работе представлены результаты расчета шестилинзовых вариантов схем объективов для ИК-области спектра. Рассмотренные варианты системы, имеющие приемлемое качество изображения: коэффициент передачи контраста для  $N \approx 16$  л/мм не хуже  $k=0.25$  по всему полю для варианта системы при  $K=3,5$  и не хуже  $k=0.35$  при диафрагменном числе  $K=2$ .

**Литература**

1. Нгуен Ван Луен. Анализ аберрационных свойств оптических систем переменного увеличения: диссерт. канд. тех. наук. – СПб.: Университет ИТМО, 2014. – 174 с.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2411557>, своб.
3. Kuo C.W., Lin C.L., Han C.Y. Dual field-of-view midwave infrared optical design and athermalization analysis // Applied optics. – 2010. – V. 49. – № 19. – P. 3691–3700.
4. Olson C. et al. Design and construction of a short-wave infrared 3.3 X continuous zoom lens // International Optical Design Conference. – Optical Society of America, 2010. – P. IWD2.

УДК 681.78

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОГО ТРАКТА  
НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИКО-  
ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО  
ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ**

Некрылов И.С.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.т.н., профессор Коротаев В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе поставлены вопросы о влиянии параметров неоднородности воздушного тракта на измерительные оптико-электронные системы и комплексы. Исследовано влияние изменения вертикального градиента температуры воздушного тракта на прохождение оптического излучения. Показано, что уменьшение температуры воздушного тракта приводит к увеличению его показателя преломления и к изменению направления оптического излучения в каждой точке воздушного тракта, и, в итоге, к линейному смещению.

**Ключевые слова:** воздушный тракт, градиент температуры, угловые измерения, линейные смещения, оптические приборы и комплексы.

Воздушный тракт представляет собой оптически неоднородную среду, в которой показатель преломления испытывает беспорядочные флюктуации. При распространении электромагнитных волн через неоднородную среду имеют место такие эффекты, как рассеяние волн, поглощение, возникновение флюктуаций амплитуды, направления распространения и других параметров волны. Многие из этих эффектов оказываются существенными для ряда практических задач, связанных с распространением оптического излучения через воздушный тракт [1]. Наличие турбулентных течений в воздушном тракте как в среде распространения оптического излучения влечет за собой искажение его направления, что оказывается критичным для прецизионных оптико-электронных измерительных систем. Наиболее подверженными влиянию воздушного тракта оказываются системы, работающие в полевых условиях, в частности системы контроля пространственного положения удаленных объектов, так как в таком случае становится невозможным контроль среды распространения оптического излучения [2]. Наиболее эффективным методом борьбы с влиянием искажающих факторов на параметры оптического излучения является их минимизация, а затем адаптивная компенсация оставшихся искажений. Таким образом, актуальна проблема нахождения параметров воздушного тракта, влияющих на ход оптического излучения, для дальнейшей минимизации искажений и получения наиболее достоверных результатов измерений.

**Влияние вертикального градиента температуры.** Применительно к измерительным оптико-электронным системам наиболее значительным искажением оптического излучения, вносимым неоднородным воздушным трактом, является поперечное смещение оптического луча, что вносит дополнительную погрешность в измерение линейных, либо угловых координат объекта [3]. Основной вклад в поперечное смещение оптического излучения вносит наличие вертикального градиента температуры воздушного тракта. Горизонтальный градиент температуры пренебрежимо мал и даже на больших дистанциях измерений вносит незначительную погрешность [4]. Рассмотрим геометрическую схему прохождения оптического излучения через воздушный тракт, по всей длине которого присутствует вертикальный градиент температуры (рис. Ошибка! Источник ссылки не найден.).

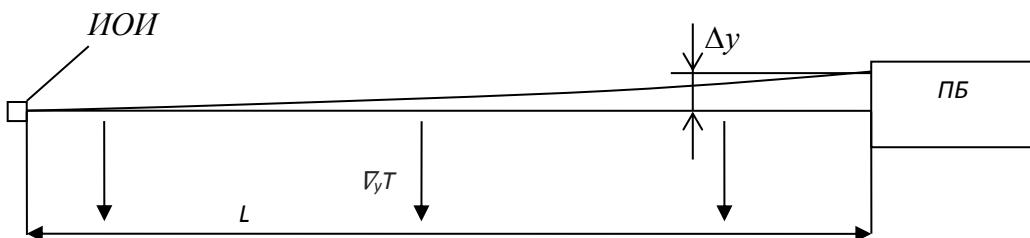


Рис. 1. Влияние вертикального градиента температуры на распространение оптического излучения

Влияние градиента температуры на ход оптического излучения объясняется зависимостью показателя преломления от температуры. В общем случае градиент показателя преломления может быть представлен следующим выражением:

$$\nabla_y n = -\frac{n-1}{T} \cdot \nabla_y T + \frac{n-1}{P} \cdot \nabla_y P - 0,155 \frac{n-1}{P} \cdot \nabla_y P_p, \quad (1)$$

где  $\nabla_y T, \nabla_y P, \nabla_y P_p$  – вертикальные градиенты температуры, давления и парциального давления водяного пара соответственно. Составляющими градиента давления и парциального давления водяного пара можно пренебречь в силу их малости, тогда выражение **Ошибка! Источник ссылки не найден.** примет вид:

$$\nabla_y n = -\frac{n-1}{T} \cdot \nabla_y T, \quad (2)$$

Очевидно, что уменьшение температуры влечет за собой увеличение показателя преломления воздушного тракта. Вследствие этого, в каждой точке участка воздушного тракта направление излучения будет меняться на некоторый угол  $da_i$ , что приведет к линейному смещению  $dy_i$  и в плоскости приемника будет смещено на значение  $\Delta y$  [5].

**Влияние турбулентных течений воздушного тракта.** Помимо вертикального градиента температуры на прохождение оптического излучения влияют также и турбулентные течения в воздушном тракте (рис. 2).

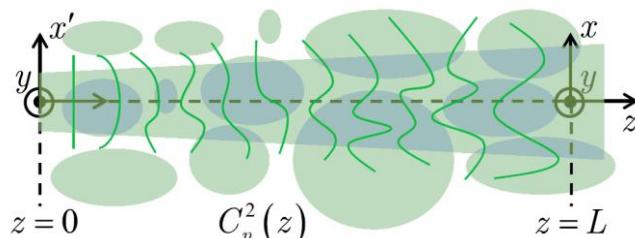


Рис. 2. Искажение формы волнового фронта при прохождении через неоднородности воздушного тракта

Существующие теории и модели турбулентности не дают полной информации о характере влияния турбулентного воздушного тракта на распространение оптического излучения, поэтому предлагается использовать приближенные инструментальные средства учета турбулентных течений на ход оптического излучения [6, 7]. Как частный случай влияния турбулентности воздушного тракта предлагается рассмотреть «дрожание» изображения источника излучения в плоскости анализа, так как вследствие этого явления, становится невозможным достоверное определение координат рассматриваемого объекта, что существенно искажает точность работы оптико-электронных измерительных систем [8].

## Литература

1. Andrews L.C. Atmospheric optics. – SPIE Field Guides, 2004. – 112 p.

2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
3. Hyde IV M.W., Basu S., Schmidt J.D. Two-dimensional simulation of optical wave propagation through atmospheric turbulence // Optics Letters. – 2015. – V. 40. – № 2. – P. 233–236.
4. Li D., Simske S. Atmospheric turbulence degraded-image restoration by kurtosis minimization // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2009. – V. 6. – № 2. – P. 244–247.
5. Неумывакин Ю.К., Перский М.И., Захарченко А.И. др. Автоматизация геодезических измерений в мелиоративном строительстве. – М.: Недра, 1984. – 126 с.
6. Fraser D., Thorpe G., Lambert A. Atmospheric turbulence visualization with wide-area motion-blur restoration // JOSA A. – 1999. – V. 16. – № 7. – P. 1751–1758.
7. Gilles J., Dagobert T., De Franchis C. Atmospheric turbulence restoration by diffeomorphic image registration and blind deconvolution // International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. – 2008. – P. 400–409.
8. Picozzi A. et al. Optical wave turbulence: Towards a unified nonequilibrium thermodynamic formulation of statistical nonlinear optics // Physics Reports. – 2014. – V. 542. – № 1. – P. 1–132.

УДК 004.932; 519.688; 531.749; 681.786.3

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОРЕФЛЕКЦИОННОЙ СХЕМЫ ПРИ СОЗДАНИИ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТАНогин А.А.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Коняхин И.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрена возможность применения автоколлиматора в авторефлексионной схеме для единовременного контроля и измерения перемещения и поворотов контролируемого объекта. Предложенный метод позволяет отслеживать четыре координаты (две угловые и две линейные), а благодаря специальному контрольному элементу и алгоритму обработки изображения уменьшает зону неработоспособности за счет ранней, по сравнению с аналогами, различия изображений анализируемых меток.

**Ключевые слова:** угловые измерения, автоколлиматор, авторефлексия, призменный контрольный элемент, алгоритмы.

**Введение.** Автоколлимационные системы давно применяются как средства контроля, юстировки и наладки оптических систем, оптико-электронных приборов, а также станков и оборудования благодаря простоте и удобству измерений. Однако, автоколлимационные системы (АС) можно использовать для контроля пространственного и углового положения объектов [1].

Для этого АС устанавливается на базовом неподвижном объекте, а на контролируемом устанавливают контрольный элемент (КЭ) – специальный зеркально-призменный отражатель. В классической схеме измерений с помощью АС, в качестве КЭ применяется плоское зеркало. Такой КЭ в сочетании с АС позволяет проводить измерения без влияния на объект измерения, без необходимости питания в точке контроля. Рабочие дистанции АС могут достигать десятков метров. Эти преимущества делают возможным применение такого рода систем в качестве средств техносферной безопасности и мониторинга инфраструктурных объектов [2].

**Измерительные схемы и контрольные элементы.** Классическое плоское зеркало, применяемое как КЭ способно создавать отклик только в случае вращения вокруг осей перпендикулярных оптической (визирной) оси системы т.е. возможно измерение только углов  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  (в соответствии с рис. 1). При этом такой КЭ не чувствителен к линейным перемещениям и углу  $\Theta_3$ .

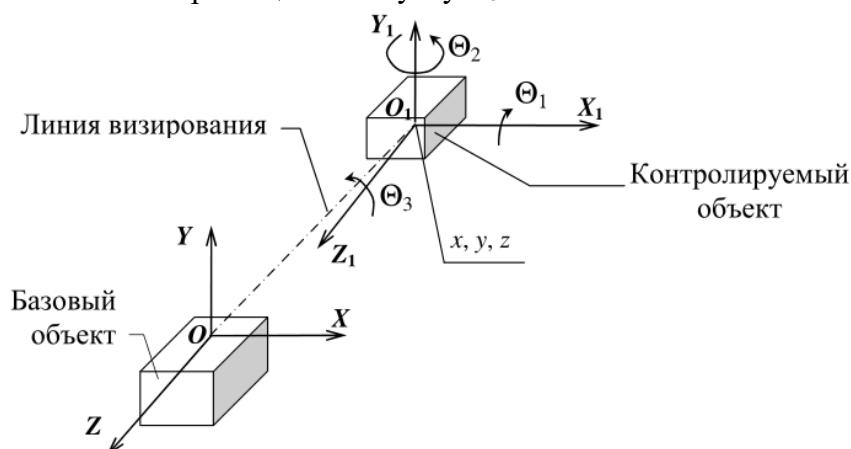


Рис. 1. Измерительная схема и ее система координат

Развитие компьютерных систем позволяет моделировать различные зеркально-призменные системы и рассматривать различные схемы измерений без необходимости их натурного моделирования и изготовления.

Одной из схем измерения с помощью автоколлиматора является авторефлексионная схема в которой в отличие от классической автоколлимационной схемы используется не параллельный пучок лучей, а сходящийся, сфокусированный на расстояние в два раза большее расстояния от базового объекта до КЭ на контролируемом объекте. Это не единственное отличие авторефлексионной схемы. В авторефлексионной схеме марка, в роли которой выступает излучающий диод (как правило ИК-диод), располагается в вершине первой поверхности объектива, также в такой схеме не применяются светоделительные элементы.

Авторефлексионная схема обладает большей рабочей дистанцией по сравнению с автоколлимационной (при равных диаметрах входного зрачка), способна работать в более широком диапазоне измерений и обладает меньшими габаритами, однако для оптической системы в авторефлексионной схеме предъявляются более жесткие требования [3].

Широкий выбор контрольных элементов позволяет подобрать необходимый для решения конкретной задачи при этом вносить изменения в блок на базовом объекте нет необходимости. Для данного исследования был выбран контрольный элемент позволяющий единовременно отслеживать как угловые перемещения контролируемого объекта вокруг осей ОХ и ОY т.е. углы  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$ , так и перемещения вдоль этих самых осей. Таким образом в данной работе рассматривается четырехкоординатная измерительная система. Общий вид такого КЭ представлен на рис. 2.

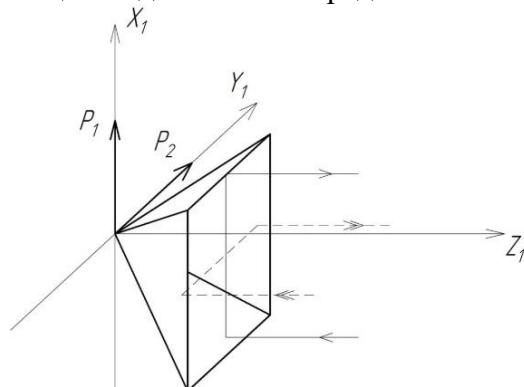


Рис. 2. Общий вид КЭ

Данный КЭ можно представить и описать как два двухгранных зеркала с прямым углом между ними (рис. 3). Данний вид представления позволяет с большим удобством составить математическую модель такого отражателя и выполнять расчет смещений, вызванных перемещением и/или поворотом контролируемого объекта.

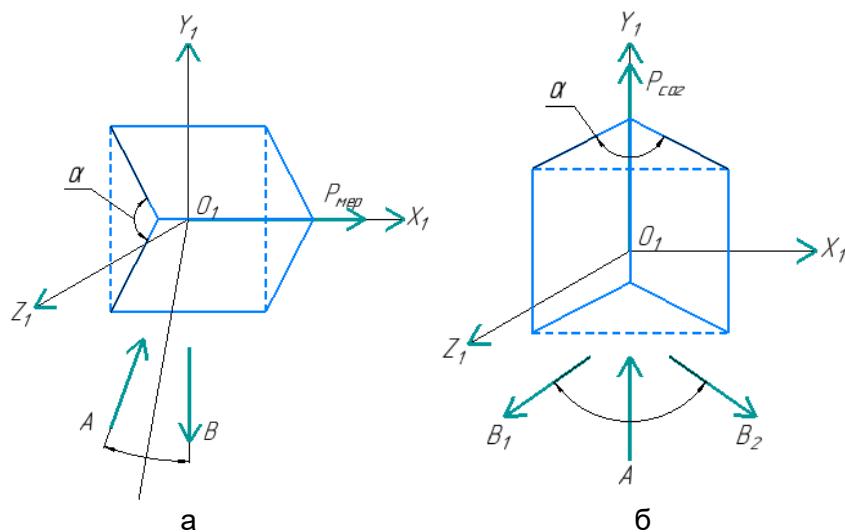


Рис. 3. Схематичное изображение КЭ в меридиональной (а) и сагиттальной (б) плоскостях

**Проблемы многокоординатных измерений.** При многокоординатных измерениях в плоскости анализа т.е. на фотоприемном устройстве (ФПУ) формируется несколько изображений меток положение каждой из которых обусловлено пространственным положением и движением контролируемого объекта (рис. 4). В начальном положении или в определенных комбинациях перемещения и вращения объекта, изображения меток могут пересекаться и накладываться друг на друга. Это является достаточно важной проблемой так как первым этапом вычислений положения объекта является определение координат центра изображения метки. При этом необходимо различать и сопоставлять метки в поле зрения так как, например, координаты метки №1 соответствуют повороту и перемещению по оси ОХ, а координаты метки №2 соответствуют поворотам и перемещению по оси ОY.

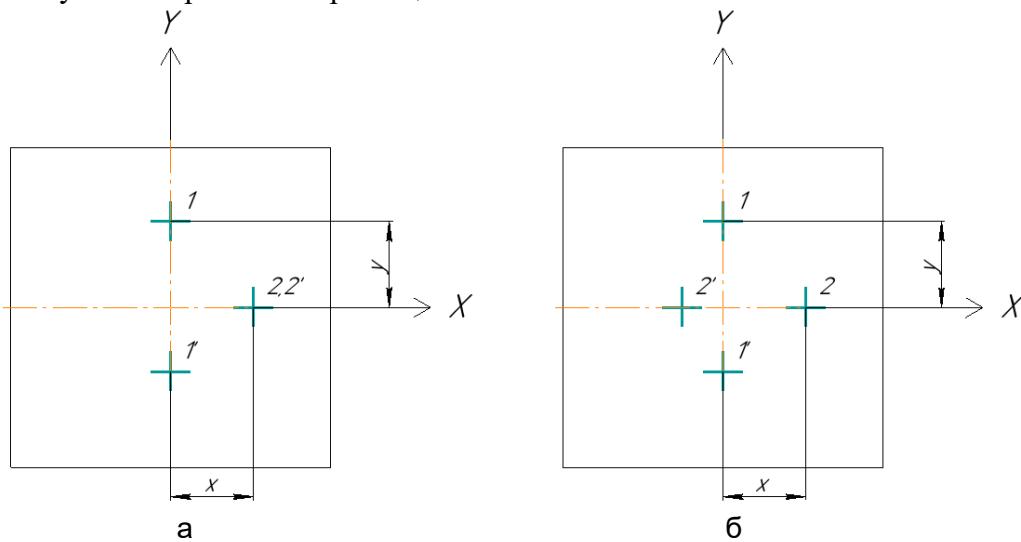


Рис. 4. Схематичное представление изображения в плоскости анализа. Смещение в линейном направлении) (а); поворот объекта (б): 1, 2 – начальное положение марок; 1', 2' – конечное положение марок

В случае пресечения и наложения меток выполнить этот шаг, как правило, не представляется возможным, и возникают зоны неработоспособности прибора. Для решения этой проблемы создаются специальные многоканальные измерительные схемы [4]. Такие решения имеют габариты и цену пропорционально количеству каналов т.е. априорно в два раза дороже одноканального исполнения. Однако современные технологии позволяют решить данную проблему разработав специальные алгоритмы отслеживающие и разделяющие изображения меток.

**Компьютерное моделирование измерительной системы.** Для оценки и изучения выбранного КЭ, а также отработки предлагаемых алгоритмов измерения координат пересекающихся меток была разработана компьютерная модель.

На компьютерной модели были изучены вопросы действия и вызываемого смещения изображения при изменении положения КЭ. Как говорилось ранее отработка модели осуществлялась при рассмотрении КЭ как двухгранных зеркал с прямым углом.

Если для продольного перемещения вдоль оси перпендикулярной оси двухгранных зеркал величина смещения изображения очевидна и равна удвоенному перемещению в плоскости предмета, то для поворотов необходимо применять матричные вычисления [5].

Наиболее удобно представлять такую модель в пространстве с помощью векторов. Для начала определим начальную точку положения предмета (метки). Приняв эту точку как начало координат (т. [0,0,0]), найдем вектор определяющий ее положение в системе координат (СК) осей зеркала (через матрицу S), который равен

$-\vec{r}[0, -l, 0]$ , где  $l$  – расстояние от марки до КЭ. Затем умножив радиус вектор на матрицу канонического вида  $P$ . Выполнив обратные преобразования координат можно найти радиус вектор изображения точки в исходных осях.

Общий вид выражения будет следующим:

$$\vec{r} = \vec{r} \times P \times S \times S^T, \quad (1)$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор от метки до КЭ;  $P$  – матрица канонического вида описывающая действие КЭ;  $S$  и  $S^T$  – прямая и транспонированная матрицы перехода между СК (могут быть разложены на три матрицы описывающие вращение вокруг каждой из осей).

Используя выражение (1) удается получить радиус-вектор точки изображения марки относительно самой марки. Результаты модели соответствуют теоретическим данным.

Затем модель была доработана и внесены изменения которые позволяют получить координаты радиус вектора точки изображения на ФПУ. Для этого выполняются следующие действия:

- вычисляется модуль  $\vec{r}$  и направляющие косинусы;
- по формуле Ньютона (2) рассчитывается новый модуль вектора;

$$|\vec{r}| \cdot |\vec{r}| = -f^2, \quad (2)$$

- рассчитываются составляющие вектора, описывающие положение точки на ФПУ.

Таким образом, полученная модель позволяет оценивать и моделировать любые повороты КЭ и достоверно получать теоретическое значение координаты центра метки на ФПУ.

Также с помощью компьютерного моделирования были исследованы различные методы отслеживания, селекции и измерения координат пересекающихся меток. Предложенный алгоритм основанный на преобразовании Хафа показал наилучшие результаты, а его точность при работе с раздельными изображениями меток не хуже алгоритма взвешенного суммирования.

**Заключение.** В работе проведено исследование авторефлексционной схемы измерения с контрольным элементом эквивалентным двум плоским зеркалам с прямым углом между гранями. Такая схема измерений позволяет осуществлять измерения четырех координат (двух линейных и двух угловых) соответствующих осям перпендикулярным визирной оси.

Результаты компьютерного моделирования подтверждают возможность использования, выбранного КЭ для применения в четырехкоординатных измерительных системах, предложенный алгоритм позволяет решать проблему многокоординатных измерений, заключающуюся в неработоспособности измерительной системы при переналожении изображений метки. С помощью компьютерной модели также можно оценить влияние различных погрешностей на точность измерений.

## Литература

1. Джабиев А.Н. и д.р. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. – СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2000. – 197 с.
2. Аникст Д.А. и др. Высокоточные угловые измерения / Под. ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Машиностроение, 1987. – 480 с.
3. Анисимов А.Г. Исследование и разработка оптико-электронной системы контроля соосности элементов турбоагрегатов большой единичной мощности: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.07. – СПб., 2012.
4. Коняхин И.А., Панков Э.Д. Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры: справочник. – М.: Недра, 1991. – 224 с.
5. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 237 с.

УДК 535.421, 531.749.1

ЗАПИСЬ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИЗМЫ  
НА ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕОкунь Р.А.<sup>1</sup>, Иванов С.А.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Никоноров Н.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрена принципиальная возможность записи голограммической призмы, характеризующейся «веерами» лучей в двух перпендикулярных плоскостях. Рассмотрены различные геометрии системы дифракционных откликов такого элемента – отклик представляет собой либо сетку дифракционных максимумов на экране, либо два набора точек, образующих прямые линии в двух перпендикулярных плоскостях.

**Ключевые слова:** фото-термо-рефрактивное стекло, ФТР-стекло, голограмма, объемная брэгговская решетка, угловая селективность, измерение угла, угловая мера.

**Введение.** При решении ряда задач нередко встают проблемы проведения угломерных/углозадающих работ в условиях ограниченного пространства, либо требуется осуществить поверку (калибровку) угломерных/углозадающих приборов на месте их базирования. Поэтому весьма актуальными становятся проблемы миниатюризации указанных устройств, а также внедрения в состав приборов встроенных средств поверки или калибровки (рабочих эталонов угла). Благодаря развитию в последние десятилетия микроэлектроники и технологии создания новых конструкционных материалов, многие угломерные/углозадающие устройства стали весьма компактными (с характерным размером на уровне дециметра). В то же время, обзор характеристик таких устройств показывает, что принцип их работы и конструкция обеспечивают их применимость лишь для ограниченного круга задач, а в ряде случаев она вообще невозможна в силу условий окружающей среды или наличия помех (например, электрических или магнитных).

Таким образом, остается актуальной разработка новых подходов, принципов и технологий создания малогабаритных высокоточных оптических образцов, которые могут использоваться, во-первых, как важнейший элемент широкого спектра угломерных/углозадающих приборов и комплексов, а, во-вторых, в качестве рабочего экспресс-эталона угла (после соответствующей калибровки по одному из первичных эталонов). Использование методов дифракционной оптики и оптической голограммии является одним из путей создания новых угломерных/углозадающих устройств с высокими точностными характеристиками, что определяется малой длиной волны света (сотни нанометров), а также высокими значениями угловой и спектральной селективности объемных голограммических (брэгговских) решеток, на основе которых создаются дифракционные оптические элементы (ДОЭ).

Спектр применения ДОЭ в различных областях оптоэлектроники, в том числе и лазерной метрологии, постоянно расширяется. Осуществляя геометрические и волновые преобразования, новые элементы позволяют проектировать и создавать оптические измерительные системы нового класса, где эталонный волновой фронт задается топологией (структурой) элемента. Брэгговские решетки, записанные в твердотельных и полимерных средах, активно применяются для создания широкой номенклатуры ДОЭ, предназначенных для управления, фильтрации, модовой селекции лазерного излучения, суммирования и разделения каналов оптической связи и т.д.

Настоящее исследование связано с разработкой новой угловой меры – «голограммической призмы» на фото-термо-рефрактивном стекле (ФТР). Разрабатываемые и создаваемые голограммические углозадающие устройства на основе мультиплексных брэгговских решеток в ФТР-стеклах позволят выполнять функцию

углозадания/углоизмерения и функцию встроенного рабочего эталона угла с использованием одного элемента, в котором будут объединены три трудносовместимые характеристики, а именно: крайне малые размеры (порядка  $10 \times 10 \times 2$  мм и вес не более 10 г), высокая стабильность характеристик (высокая механическая, термическая прочность, химическая устойчивость и долговечность) и высокая точность угловых измерений (точность задания угла порядка 1–3 угл. сек). В частности, создание и внедрение таких элементов позволит оснастить сверхточными малогабаритными мерами плоского угла приборы и устройства оптических систем позиционирования и навигации, что будет способствовать появлению новых типов таких систем, а также позволит осуществлять их поверку/калибровку непосредственно на месте базирования, что приведет к повышению удобства и безопасности их использования, а также к снижению затрат временных и финансовых ресурсов.

Непосредственной целью настоящего исследования является разработка и создание угловой меры с распределением дифракционных откликов, формирующих «веер» лучей в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

**Теоретические основы мультиплексирования брэгговских решеток для задачи создания голограммической призмы.** В основе создания элементов формирующих «веер» лучей лежит принцип мультиплексирования брэгговских решеток. Данный принцип заключается в том, что в одном объеме регистрирующей среды записывается несколько голограммических решеток с рассчитанными, определенным образом параметрами [1].

Для случая обычной пропускающей решетки вектор решетки ориентирован параллельно рабочей поверхности образца. Для записи такой решетки используют симметричные схемы записи, когда опорный и предметный луч имеют один угол падения на поверхность образца. В свою очередь для создания «веера» из дифрагированных лучей необходимо записать несколько решеток в одном объеме стекла, таким образом, причем так, чтобы у них был один общий считающий луч и разные дифрагированные. Описанный случай возможен, когда вектора решеток повернуты относительно друг друга. Для записи таких решеток необходима уже не симметричная схема записи, т.е. чтобы опорный и предметный лучи падали под разными углами на рабочую грань элемента. Добиться этого можно вращением образца вокруг оси перпендикулярной плоскости записи в симметричной схеме записи [2].

**Геометрии голограммической призмы с распределением дифракционных откликов формирующих «веер» лучей в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.** Для записи «вееров» в двух перпендикулярных плоскостях необходимо внутри регистрирующей среды создать две ортогональные системы брэгговских решеток. При этом, система решеток, отвечающих каждому «вееру» будет располагаться в соответствующей плоскости.

Простой способ реализации такого «веера» можно осуществить для случая нормального падения считающего излучения на поверхность образца (тип 1). В такой геометрии решетки, записанные внутри среды, отклоняют часть падающего излучения под заданными углами. Таким образом, мы получаем яркий центральный луч, вокруг которого строится система из дифрагированных лучей.

Вторым подходом к созданию системы лучей в двух плоскостях является случай падения считающего излучения под углом порядка нескольких десятков градусов (тип 2). В данной ситуации «веер» в одной плоскости будет считываться падающим лучом, а «веер» в ортогональной плоскости будет считываться лучом, идущим по нормали к поверхности элемента после дифракции считающего излучения на одной из решеток первого «веера».

В данной системе решетки раскладывающие считающий луч в «веер» в одной плоскости обладают малым периодом и соответственно большими углами записи, а второй «веер» формируется решетками малого периода, раскладывающими луч, идущий по нормали к поверхности после дифракции.

В настоящей работе для записи такой системы голограмм использовалась оптическая схема с делением пучка по полю. Такой способ деления позволяет минимизировать расстояние между предметным и опорным лучом, а как следствие обеспечить более быстрое схождение лучей при фиксированном угле сведения. Этот параметр является крайне важным при записи решеток с углом сведения меньше градуса, так как деление пучка по апертуре, по сравнению с наиболее компактным вариантом схемы деления пучка по амплитуде, позволило уменьшить длину схемы с 7 м до 100 см. Возможность сведения пучков на гораздо меньшем расстоянии, позволяет избежать проблемы самодифракции излучения при его распространении и повысить качество записываемых решеток. С учетом длины когерентности лазера было принято решение разместить опорное и предметное зеркало на разном расстоянии от лазера. Таким образом, была обеспечена возможность свободного поворота предметного зеркала.

**Экспериментальные результаты.** Согласно приведенным выше выкладкам были записаны два экспериментальных образца первого и второго типа. В элементе первого типа были записаны 8 голограмм, которые обеспечивают отклонение центрального луча на 3 и 6 градусов. На рисунке, а представлена фотография картины дифракции на элементе первого типа излучения Не-Не лазера с длинной волны излучения 632,8 нм. Как видно из приведенной фотографии (рисунок, а) помимо основных лучей двух «вееров» присутствует 16 побочных лучей во всех четвертях координатной сетки относительно центрального луча. Таким образом, можно заключить, что подобная система решеток формирует симметричную координатную сетку из лучей. Данный эффект связан с тем, что брэгговские решетки обладают селективностью только в одной плоскости. Соответственно, «веер» разложенный в горизонтальной плоскости может считать каждую решетку в вертикальной плоскости и наоборот. Также, стоит отметить, что решетки в данной системе обладают очень большим периодом и, как следствие, низкой угловой селективностью.

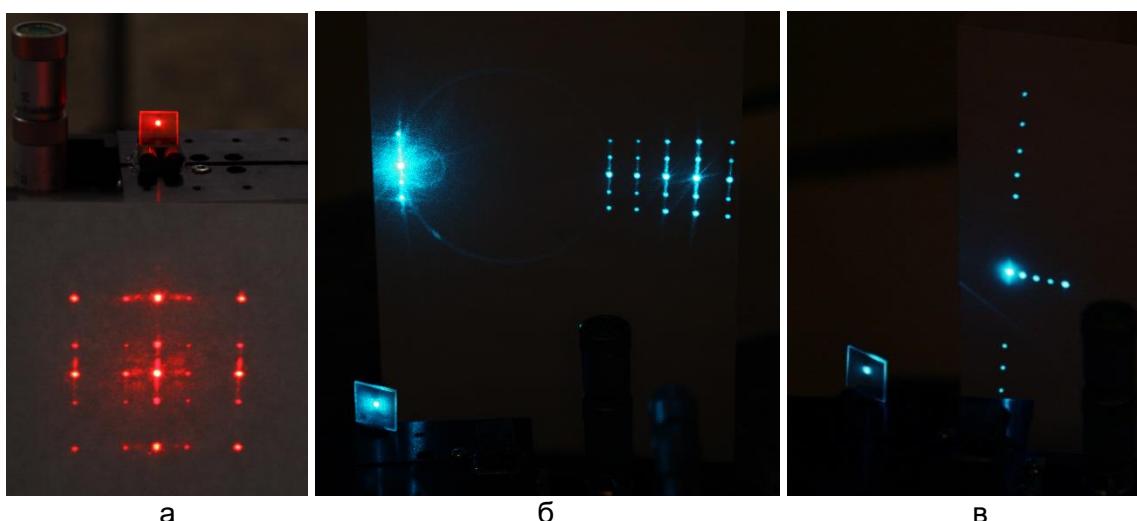


Рисунок. Фотография следов дифрагированных лучей на экране для элемента: первого типа с малыми углами дифракции (а); второго типа с малыми и большими углами дифракции (б); второго типа с большими углами дифракции в обеих плоскостях (в)

Аналогичную картину можно наблюдать и для элемента второго типа (рисунок, б), где система из 5 лучей в горизонтальной плоскости раскладывается по вертикали четырьмя решетками.

Далее был записан экспериментальный образец, в котором решетки обоих «веер» обладают малым периодом (порядка или меньше 1 мкм) и, соответственно обеспечивают больший угол дифракции и большую селективность (рисунок, в). На фотографии видно, что в такой конфигурации работают только основные лучи.

**Заключение.** Таким образом, в результате исследования, можно заключить, что основной причиной появления побочных лучей является низкая селективность записываемых решеток. Чтобы избежать данного эффекта – необходимо увеличивать селективность решеток, чего можно добиться либо уменьшением периода решеток, либо увеличением толщины элемента.

Также в работе продемонстрированы различные геометрии системы дифракционных откликов, представляющие собой как сетку из дифракционных максимумов на экране, так и две отдельных линии из точек расположенных в двух перпендикулярных плоскостях.

Ранее созданные модификации голограммической призмы позволяют проводить измерение только плоского угла. Плоскость измерения задается взаимным расположением голограммической призмы и линейки фотоприемников. Полученные в настоящем исследовании элементы позволяют расширить область применения голограммической призмы, поскольку предоставляют возможность измерения угла в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях.

### **Литература**

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голограмма. – М.: Мир, 1973. – 698 с.
2. Ангервакс А.Е. и др. Голограммическая призма на фото-термо-рефрактивном стекле: требования и возможности // Оптика и спектроскопия. – 2017. – Т. 123. – № 6. – С. 963–969.

УДК 621.383.681.7

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ БИОМЕТРИИ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ

МОДЕЛИРОВАНИИ ГЛАЗА ИНДИВИДУУМА

Евлампьева Е.С.<sup>1</sup>, Олюнин В.В.<sup>1</sup>, Руховец А.Г.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н. Черкасова Д.Н.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

Разработаны и приводятся алгоритмы математического моделирования оптической системы глаза индивидуума с применением результатов биометрии, субъективной рефрактометрии и схематической модели глаза по Гульстранду, включая правильный астигматизм. Приведены модели шести глаз эмметропов и десяти глаз амметропов, причем пятнадцать глаз с учетом правильного астигматизма. Исследовано влияние измеренных параметров на параксиальные характеристики с применением ПО MathCAD и ПО ОПАЛ.

**Ключевые слова:** соразмерный глаз, аметропия, А-скан, переднезадний отрезок ( $d_{OQ}$ ), оптическая биометрия, субъективная рефрактометрия, правильный астигматизм.

**Введение.** В настоящее время разработка компьютерных моделей оптических систем глаза индивидуума вызывает большой научный и практический интерес в связи с внедрением технологий ионной полировки и интраокулярной коррекции в офтальмологическую практику. В процессе моделируют глаз как готовую оптическую систему. В отличие от контактного ультразвукового А-скана оптическая биометрия – это оптический бесконтактный метод измерения не только осевых отрезков, но и формы передней поверхности роговицы, ее светового диаметра и диаметра зрачка как апертурной диафрагмы. Однако, на основе даже этих метрологических данных невозможно моделировать, не зная об аметропии конкретной оптической системы. Эти данные должны быть получены, например, в результате оптометрических исследований по методу субъективной рефрактометрии. Данная тематика носит гуманитарный характер, чем объясняется ее непреходящая значимость [1, 2].

**Модель.** Исследование зрительных анализаторов шестнадцати добровольцев, проведенное методами субъективной рефрактометрии, позволило разделить группу по признаку аметропии следующим образом: шесть глаз эмметропов, девятыи – миопов и одного глаза гиперметропа.

На рис. 1 показаны принципиальные схемы соразмерного глаза и глаза миопа и обозначены оптические параметры, измеренные по методам биометрии и субъективной рефрактометрии.

Положение  $a_R$ , мм, дальнейшей точки ясного видения для аметропов определялось следующим выражением (рис. 1, б):

$$a_R = 12 - S'_H + f'_1. \quad (1)$$

Биометрия проведена за прибором LS-900 фирмы *Haag-streit diagnostics*. В табл. 1 приведены метрологические данные эмметропов. В табл. 2 представлены данные миопов (столбцы 2–10) и одного гиперметропа (столбец 11). При моделировании введены следующие допущения:

- модели глаза носят вероятностный характер, так как основаны на результатах измерений;
- все оптические характеристики, включая длину глаза  $d_{OQ}$ , изменяются соразмерно только у эмметропа (соразмерный глаз);
- аметропия подразделяется на миопию (близорукость), гиперметропию (дальнозоркость); у аметропов сохраняется соразмерность оптической системы глаза, длина  $d_{OQ}$  не подчиняется факту соразмерности (осевая миопия);

- в качестве средней статистической модели принят соразмерный «Схематический глаз» по Гульстранду (ГОСТ 14934-88) (СХГ). Переход от средней статистической модели к модели индивидуума допустим в пределах биологической изменчивости последней [3].

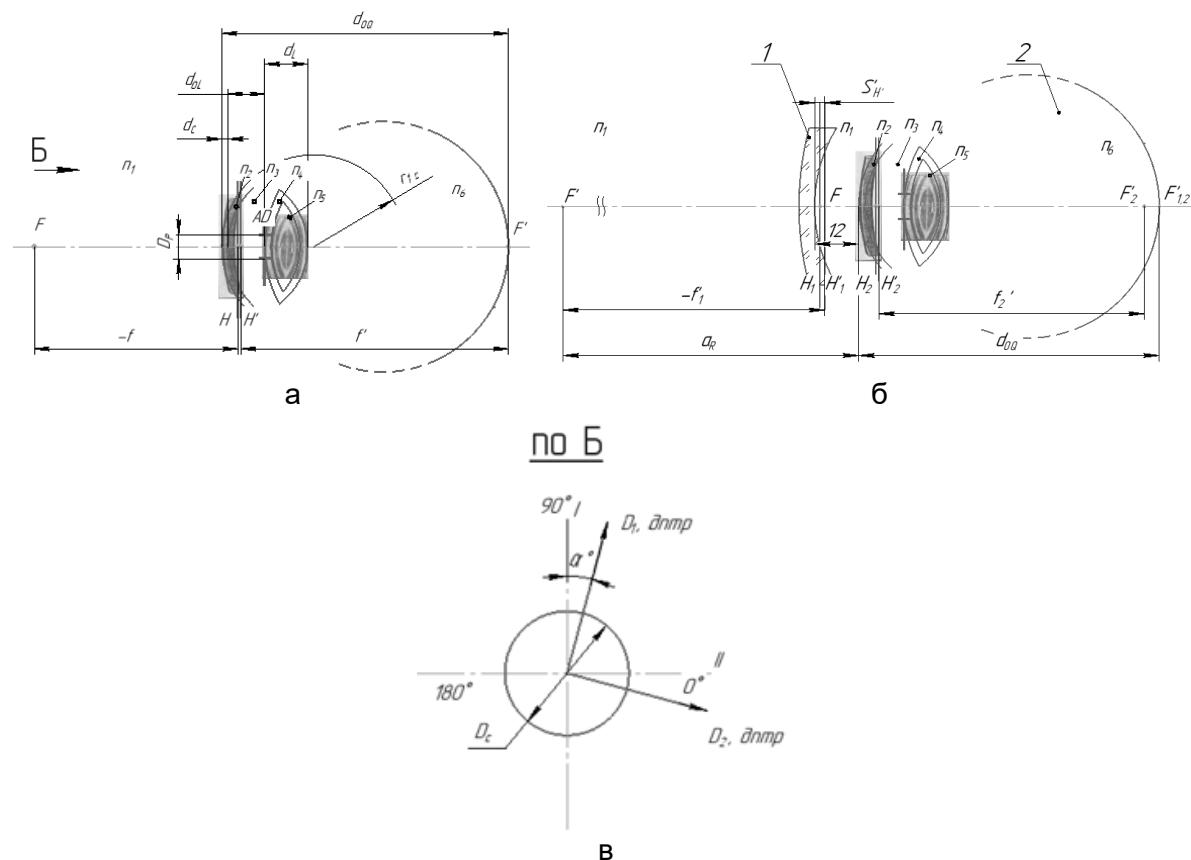


Рис. 1. Оптическая схема глаза индивидуума

Таблица 1. Оптические характеристики оптической системы глаза индивидуумов

Параметр	Доброволец	Эмметропия					
		№1	№2	№3	№4	OD	OS
Биометрия	Результаты биометрии	OD	OS	OD	OS	OD	OS
	Переднезадний отрезок $d_{OQ}$ , мм	24,69	23,6	24,91	24,69	24,91	25,03
	Толщина роговицы $d_C$ , мм	0,601	0,538	0,537	0,539	0,588	0,581
	Глубина передней камеры $d_{OL}$ , мм	3,59	2,68	3,11	3,15	2,99	3,01
	Толщина хрусталика $d_L$ , мм	3,33	3,22	3,27	3,27	3,54	3,57
	Диаметр зрачка глаза $D_P$ , мм	5,69	5,45	5,44	4,95	6,05	5,76
	Диаметр роговицы $D_C$ , мм	12,74	11,6	12,37	12,41	12,46	12,51
	Радиус передней поверхности роговицы $r_{C1}$ , мм:						
	— сильный меридиан, $r_1$ , мм	7,82	7,85	8,01	7,99	8,49	8,54
	— слабый меридиан $r_2$ , мм	7,96	7,97	8,19	8,15	8,63	8,7
	Параксиальный радиус $r_{\text{пар}}$ , мм	7,938	7,954	8,156	8,122	8,608	8,672
	Рефракция роговицы						
	— сильный меридиан $D_1$ , дптр	43,15	42,99	42,12	42,22	39,75	39,51
	— слабый меридиан $D_2$ , дптр	42,39	42,36	41,22	41,39	39,1	38,77
	Астигматическая разность $As$ , дптр	-0,76	-0,64	-0,9	-0,83	-0,66	-0,73
	Угол оси $\alpha$ , град	2	36	7	170	5	0

Параметр	Доброволец	Эмметропия					
		№1	№2	№3		№4	
Mathcad, Опал	$K_{\text{пер}}$	1,011	0,983	1,038	1,029	1,038	1,043
	Параксиальные характеристики по $K_{\text{пер}}$						
	$f$ , мм	-17,24	-16,76	-17,7	-17,55	-17,7	-17,79
	$f'$ , мм	23,03	22,39	23,65	23,44	23,65	23,76
	$S_H$ , мм	1,36	1,32	1,39	1,39	1,4	1,4
	$S_{H'}$ , мм	-5,66	-5,51	-5,81	-5,76	-5,81	-5,84
	$S_p$ , мм	3,63	3,54	3,74	3,7	3,73	3,75
	$S_{p'}$ , дптр	-49,15	-50,55	-47,87	-48,29	-47,87	-47,64
	Измеренные параксиальные параметры						
	$f$ , мм	-17,56	-16,67	-17,9	-17,82	-18,67	18,8
	$f'$ , мм	23,46	22,27	23,92	23,81	24,95	25,12
	$S_F$ , мм	-16,08	-15,48	-16,58	-16,48	-17,27	-17,39
	$S_{F'}$ , мм	17,66	17,28	18,61	18,47	19,53	19,67
	$S_H$ , мм,	1,47	1,19	1,33	1,34	1,4	1,41
	$S_{H'}$ , мм	-5,80	-4,99	-5,32	-5,35	-5,42	-5,44
	$S_p$ , мм	4,19	3,21	3,64	3,69	3,58	3,59
	$S_{p'}$ , дптр	-49,20	-50,36	-47,21	-47,51	-44,76	-44,43

Таблица 2. Оптические характеристики оптической системы глаз аметропов

Параметр	Доброволец									
	№1		№2		№3	№4		№5		№6
	OD	OS	OD	OS	OS	OD	OS	OD	OS	OD
Рефракция ОЛ	-5,5	-5,5	-2	-1,75	-0,75	-0,5	-0,5	-0,25	-0,25	0,75
$F'_{v'}$ , дптр										
$a_R$ , мм	-196,6	-196,6	554	-641,2	1746	-3250	-3250	-5025	-5025	1333
$f'_1$ , мм	-187,9	-187,9	-555	-642,2	-1773	-3313	-3313	5043	5043	1022
$S'_{H'}$ , мм	3,27	3,27	13,9	13	39,09	74,74	74,74	29,09	29,1	-25,7
$d_{OQ}$ , мм	25,5	25,4	23,34	23,25	25,65	24,09	24,21	25,7	25,4	23,8
$d_C$ , мм	0,578	0,578	0,491	0,484	0,594	0,549	0,542	0,481	0,47	0,53
$d_{OL}$ , мм	2,82	2,88	3,5	3,56	3,74	3,49	3,53	3,45	3,45	2,68
$d_L$ , мм	3,54	3,53	3,35	3,34	3,31	3,59	3,59	3,48	3,92	3,45
$D_P$ , мм	5,53	5,67	6,03	6,34	6,47	5,65	6,26	4,95	6	5,26
$D_C$ , мм	11,92	11,8	12,16	12,19	13,04	12,7	12,86	12,17	12,2	11,5
$r_1$ , мм	7,44	7,39	7,19	7,18	7,88	7,84	7,89	8,11	8,02	7,94
$r_2$ , мм	7,48	7,39	7,27	7,24	8,02	7,87	7,92	8,21	8,19	8,04
$r_{\text{пар}}$ , мм	7,488	7,41	7,26	7,24	7,99	7,88	7,931	8,2	8,15	8,03
$D_1$ , дптр	45,39	45,66	46,93	47	42,85	43,03	42,78	41,61	42,1	42,5
$D_2$ , дптр	45,13	45,66	46,43	46,63	42,1	42,89	42,6	41,1	41,2	41,9
$A_S$ , дптр	-0,28	0	-0,52	-0,37	0	-0,14	-0,18	-0,5	-0,9	-0,6
$\alpha$ , град	14	-	179	12	177	157	22	32	153	105

Алгоритм расчета параксиальных характеристик глаз индивидуумов имеет две модификации: расчет оптической системы соразмерного глаза (табл. 1, столбцы 3–8). Схема соразмерного глаза приводится на рис. 1, а. Вероятностные модели рассчитаны в пакете прикладных программ ОПАЛ, для этого:

1. производится ввод  $C \times \Gamma$ ;
2. рассчитывается коэффициент пересчета:

$$K_{\text{нep}} = \frac{d_{OQ}}{d_{OQ} c_{xI}} ; \quad (2)$$

3. рассчитываются параксиальные характеристики глаза индивидуума по коэффициенту пересчета;
4. в случае правильного астигматизма рассчитывается параксиальный радиус передней поверхности роговицы и вводится в модель наряду с другими измеренными характеристиками по формуле [4]:

$$r_{\text{нap}} = 0,7r_2 + 0,3r_1 + 0,02, \quad (3)$$

где 0,02 – поправка к характеристическому радиусу роговицы.

Если результаты биометрии показывает отсутствие правильного астигматизма глаза, то измеренные параметры «тора» (табл. 1 и 2) наносится на фронтальную поверхность роговицы, а корректирующий тор – на фронтальную поверхность хрусталика.

**Результаты.** Результатом расчета соразмерного глаза в системе ОПАЛ – параксиальные характеристики  $f, f', S_F, S_F', S_H, S_H', S_P, S_P'$ . Проверка соответствия рассчитанных и измеренных оптических характеристик выполнено путем ввода в модели соразмерных глаз результатов измерений:  $r_{\text{нap}}, d_{OQ}, d_c, d_{OL}, d_L, D_C, D_P$ . Результаты приводятся в таблице. Расчет в ППП ОПАЛ показал отличие фактических параксиальных характеристик (табл. 1, рис. 1, а). Окончательно построение математической модели можно получить как результат оптимизации.

По результатам измерений рефрактометрии рассчитаны очковые линзы в системах MathCAD и ОПАЛ, в частности фокусные расстояния и расположения главный плоскостей (табл. 2). В случае аметропии данных биометрии и субъективной рефрактометрии оказалось недостаточно для математического моделирования.

**Заключение.** В работе исследованы возможности применения метода биометрии при моделировании оптической системы глаза индивидуума. Показано, что этих измерений недостаточно для построения математической модели глаза индивидуума. Однако применение дополнительных исследований по методу субъективной рефрактометрии показали возможность моделирования соразмерного глаза. Приводятся шесть моделей соразмерных глаз, полученные в результате габаритного расчета. При вводе в полученные модели данных измерений оказалось, что требуется этап их оптимизации. Возможности моделирования глаз с аметропией могут быть уточнены в результате дополнительных исследований.

## Литература

1. Bang S. et al. Accuracy of intraocular lens calculations using the IOLMaster in eyes with long axial length and a comparison of various formulas // Ophthalmology. – 2011. – V. 118. – № 3. – P. 503–506.
2. Бахолдин А.В., Коршикова Н.Ф., Черкасова Д.Н. Компьютерное моделирование оптической системы глаза индивидуума // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 4. – С. 68–73.
3. Mutze K., Rohleider F. Praktsche Augenoptik. Formelnsammlung und Tabellenbuch. – Berlin: VEB Verlagstechnik, 1968. – 238 р.
4. Киваев А.А., Шапиро Е.И. Контактная коррекция зрения. – М.: ЛДМ Сервис, 2000. – 224 с.

УДК 621.383.51, 620.91

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИБРИДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТРОЙНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Онищук Д.А.<sup>1</sup>, Литвин А.П.<sup>1</sup>, Щербинин Д.П.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н., доцент Парфенов П.С.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе представлен анализ электрофизических параметров гибридных солнечных элементов на основе тройных соединений сопряженных полимеров, производных фуллеренов и нанокристаллов PbS, проводится обсуждение таких методов характеризации процессов, протекающих в солнечных элементах, как С-В метрия, J-V метрия, а также методы, описываемые законами Мотта–Шотки и Мотта–Гурни.

**Ключевые слова:** нанокристаллы, солнечный элемент, коэффициент идеальности, встроенный потенциал, плотность носителей заряда, ловушечные состояния.

**Введение.** В настоящее время все большее распространение получают оптоэлектронные устройства на основе нанокристаллов (НК). К таковым в первую очередь можно отнести солнечные элементы (СЭ) и светодиоды. Использование НК вместо монокристаллических структур, полученных эпитаксиальными методами, позволяет упростить процесс изготовления устройств, а также сделать его менее затратным. Однако эффективность работы устройств на основе НК зависит от большего числа факторов и для улучшения их эффективности необходимо полное понимание происходящих в них процессов. Целью данной работы является анализ электрофизических параметров гибридных СЭ на основе тройных соединений сопряженных полимеров, производных фуллеренов и НК PbS, позволяющих расширить спектр поглощения СЭ до ближнего инфракрасного диапазона и тем самым улучшить эффективность СЭ [1]. Понимание всех процессов, происходящих в данного рода устройствах, позволит расширить представления о СЭ на основе НК и получать, в дальнейшем устройства с большей эффективностью преобразования энергии.

**Методы анализа.** Рекомбинация носителей заряда в активном слое СЭ может протекать несколькими путями, в первую очередь это межзонная рекомбинация, но также возможна рекомбинация через промежуточные ловушечные уровни, а также Оже и экситонная рекомбинация. Для наиболее простого способа характеризации данных процессов можно использовать эквивалентную электрическую схему замещения СЭ (рис. 1) [2].

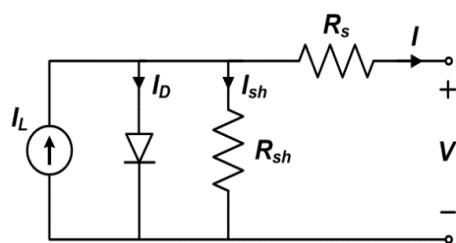


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема замещения солнечного элемента [2]

Эквивалентная диоду структура дает представление о потерях тока на р-п-переходе при изменении напряжения. В этой схеме  $I_L$  – фотогенерируемый ток.  $R_{sh}$  и  $R_s$  – это паразитные шунты (паразитные контакты р-п-перехода, приводящие к возникновению токов утечки) и последовательные сопротивления (сопротивление контактов и объемного слоя материалов СЭ) [3]. В идеальном солнечном элементе,  $R_{sh}$  и  $R_s$  равны бесконечности и нулю соответственно.

Важным параметром при анализе ВАХ солнечных элементов является встроенный («build-in») потенциал ( $V_{bi}$ ). В простейшем случае  $V_{bi}$  – это разность рабочих функций ( $\Delta\phi$ ) анода и катода, между которыми находится полупроводник [4].  $V_{bi}$  в первую очередь влияет на напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ ), но от него также зависит плотность тока ( $J$ ), внутреннее электрическое поле ( $E$ ), концентрация зарядов ( $N_d$ ), и, следовательно, эффективность элемента [5].

Одним из способов определения  $V_{bi}$  является измерение емкости СЭ в зависимости от приложенного напряжения (Capacitance vs. Voltage, или  $C-V$ ), данный метод также называют именами Мотта–Шоттки и описывают следующим выражением:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{A^2 q \epsilon \epsilon_0 N_D} (V_{bi} - V_{appl}), \quad (1)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $N_D$  – плотность носителей заряда;  $V_{bi}$  – build-in потенциал;  $V_{appl}$  – приложенный обратный потенциал;  $A$  – площадь ячейки;  $q$  – элементарный заряд.

Наклон  $C-V$  характеристики, пересчитанной как  $C^2$  будет отражать плотность носителей заряда  $N_D$  и определяться выражением (1), а экстраполяция графика с наклоном  $C^2$  до горизонтальной оси укажет на величину  $V_{bi}$ .

Для расчета подвижности носителей заряда используются темновые  $J-V$  характеристики, в логарифмическом масштабе которых явно прослеживаются три области, характерные различным процессам переноса заряда в устройстве.

Первой области свойственна омическая проводимость, во второй наблюдается  $IL$  (injection limited) ток, в этом случае ток возрастает экспоненциально ( $J \approx \exp(qV/kT)$ ), а средняя плотность носителей заряда в активном слое приближается к плотности заряда на контактах. В третьей области начинает протекать  $SCL$  (space charge limited) ток, т.е. плотность тока, протекающего в устройстве, становится меньше инжектируемого с kontaktов ( $J \sim V^2$ ). Данный ток возникает только в том случае, если время прохождения любых избыточных зарядов не превышает время диэлектрической релаксации и описывается уравнением (2), однако данное уравнение не учитывает влияние ловушек и больше подходит для описания плотности тока в устройствах с одним типом носителей.

$$J = \frac{9}{8} \epsilon \epsilon_0 \mu_0 e^{\gamma \sqrt{\frac{V}{L}}} \frac{V^2}{L^3}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – подвижность при нулевом поле;  $\gamma$  – фактор активации поля;  $L$  – толщина слоя НК.

Всем этим областям, в двойном логарифмическом масштабе, характерен разный коэффициент наклона « $n$ ». Так при  $n=1$  область соответствует омической проводимости, а при  $n=2$  –  $SCL$  току, область между ними соответствует току, ограниченному за счет ловушечных состояний.

**Результаты.** Для анализа влияния компонентов на свойства солнечных элементов на основе P3HT-PbS-PCBM были изготовлены семь образцов СЭ различной структуры (табл. 1) и проведен анализ их электрофизических параметров.

Таблица 1. Изготовленные образцы СЭ

Образец	Структура
Au_1	ITO / ZnO / P3HT-PbS / PEDOT:PSS / Au
Au_2	ITO / ZnO / P3HT-PbS-PCBM / PEDOT:PSS / Au
Al_1	ITO / PEDOT:PSS / P3HT-PCBM / ZnO / Al

Образец	Структура
Al_2	ITO / PEDOT:PSS / P3HT-PCBM / Al
Al_3	ITO / PEDOT:PSS (thin) / P3HT-PCBM / ZnO / Al
Ag_1	ITO / PEDOT:PSS / P3HT-PCBM / ZnO / Ag
Ag_2	ITO / PEDOT:PSS / P3HT-PCBM-PbS (3wt%) / ZnO / Ag

Основные параметры СЭ, такие как напряжение холостого хода ( $V_{OC}$ ), ток короткого замыкания ( $J_{SC}$ ) и эффективность преобразования энергии (PCE) были получены по световым  $J$ – $V$ . Значения  $R_S$  для световой кривой оценивается в точке пересечения кривой с осью ОХ, для темновых кривых данный метод не подходит, поэтому для них  $R_S$  определялся по графику дифференциального сопротивления ( $R_{diff}$ ). Рассмотрим анализ на примере образца Ag\_2. На основании расчетов дифференциального сопротивления темновые значения  $R_{SH}$  и  $R_S$  для него составили 38,9 Ом·см<sup>2</sup> и 2,8 Ом·см<sup>2</sup> соответственно (рис. 2, а), а световые 21,4 Ом·см<sup>2</sup> и 14,9 Ом·см<sup>2</sup> для  $R_{SH}$  и  $R_S$  соответственно. Видно, что значение  $R_{SH}$  при освещении уменьшилось вдвое, а  $R_S$  – выросло впятеро. Различие световых и темновых значений связывают с эффектами, возникающими при освещении, например неравномерное поглощение света активным слоем, приводящее к разным сопротивлениям в разных областях [6].

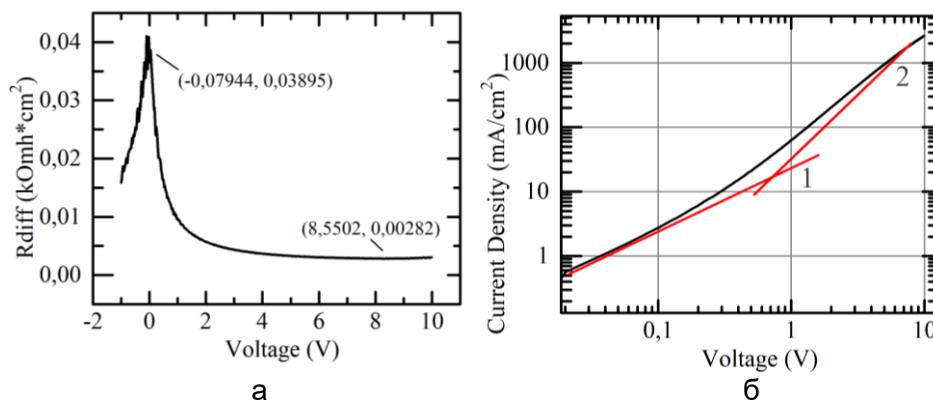


Рис. 2. Образец Ag\_2: график дифференциального сопротивления (а); темновая  $J$ – $V$  характеристика образца, прямыми линиями обозначен наклон, равный единице и двум (б)

Расчет величины  $R_{SH}$  также можно проводить по первому сегменту темновой  $J$ – $V$  характеристики (рис. 2, б), при этом значения практически совпадают со значениями, полученными по графику  $R_{diff}$  (36 Ом·см<sup>2</sup>).

Так как оцениваются параметры именно СЭ, то для получения достоверных данных о процессах, протекающих на  $p$ - $n$ -переходе, необходимо учесть потери, вызванные  $R_S$ . Исходя из того, что ток через СЭ элемент описывается выражением (3):

$$J = J_0 \left( \exp\left(\frac{q(V - JR_s)}{nkt}\right) - 1 \right) + \frac{V - JR_s}{R_{SH}} = J_D + J_{SH}, \quad (3)$$

где  $J_0$  – ток насыщения;  $n$  – коэффициент идеальности диода;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура, то напряжение на диодном переходе будет описываться следующим выражением:

$$V_D = V - JR_s. \quad (4)$$

Скорректированные на потери напряжения темновые  $J$ – $V$  кривые представлены на рис. 3, а. Перестроив полученный график в осах  $\ln(J)/V$  (рис. 3, б) и определив экспоненциальные участки, можно рассчитать коэффициенты идеальности диода  $n$  по формуле, которая следует из формулы (3):

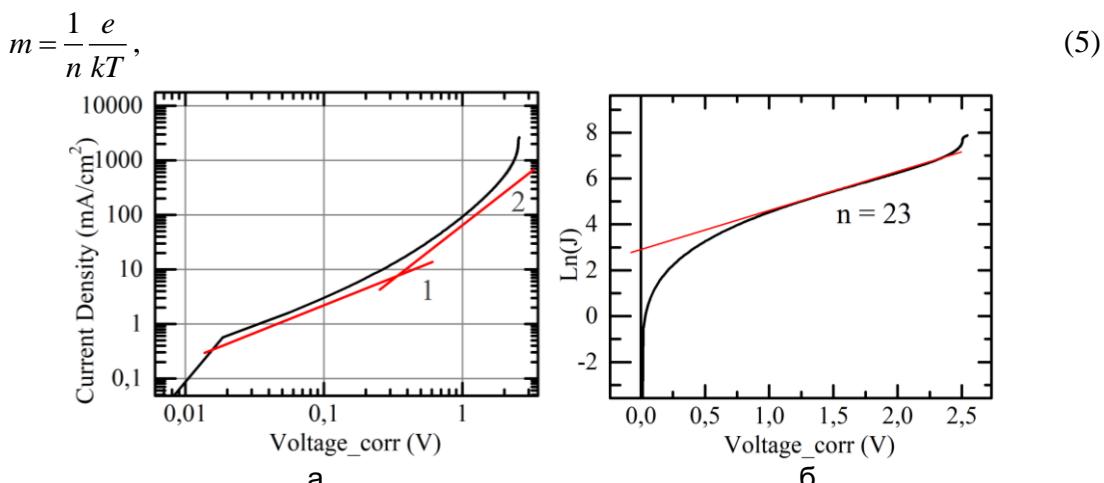


Рис. 3. Темновая  $J$ – $V$  характеристика образца Ag\_2, скорректированная на величину потерь на последовательном сопротивлении: двойной логарифмический масштаб, прямыми линиями обозначен наклон 1 и 2 (а); логарифмический масштаб, прямая линия показывает коэффициент идеальности 23 (б)

Коэффициенты идеальности, полученные из наклона кривой в экспоненциальном участке, характеризуют процессы рекомбинации в устройстве. Например, в кремниевых диодах при малом напряжении преобладает рекомбинация в обедненной зоне, чему соответствует коэффициент, равный двум. Однако, при увеличении напряжения ширина обедненной зоны уменьшается, и тогда более значительной становится межзонная рекомбинация ( $E_C$ – $E_V$ ) в квази-нейтральной области перехода, о чем говорит коэффициент идеальности, равный единице [7, 8]. Оже-рекомбинация имеет фактор идеальности, равный  $2/3$  [9], а при высокой степени легирования фактор идеальности также равен двум [8]. Часто для описания  $J$ – $V$  характеристик используют несколько факторов идеальности, так как они могут меняться с изменением величины приложенного напряжения.

Для определения значения встроенного потенциала ( $V_{bi}$ ) полученные  $C$ – $V$  характеристики перестроили в  $C^{-2}/V$  осях (рис. 4 (а)), однако рассчитать значения  $V_{bi}$  и концентрации носителей заряда ( $N_D$ ) оказалось возможно далеко не для всех образцов. Так, для образца Au\_1 экстраполяция графика  $C^{-2}$  дает завышенное значение, в то время как значения, полученные из максимума емкости, близки к теоретическому значению  $V_{bi}$  для ИТО и золота (0,4–0,6 В). Вероятно, это связано с тем, что классическая модель Мотта–Шоттки разработана для анализа переходов с неравновесной концентрацией носителей заряда и отсутствующими ловушечными состояниями, она полностью адаптирована для описания  $C$ – $V$  характеристик только кремниевых СЭ. Для получения более точных результатов для СЭ на основе НК необходимо применять модифицированную модель [10]. Кроме того в работе [11] показано, что активный слой НК СЭ представляет собой объемную проводящую емкость, не ограниченную шириной обедненной зоны, и к этой емкости добавляется постоянная емкость, образуемая ИТО и металлическими контактами. Поэтому оценка  $V_{bi}$  по графикам  $C$ – $V$  без пересчета на  $C^{-2}$  может оказаться даже точнее, так как на них образуется пик при напряжении, немного меньшем чем  $V_{bi}$ . Одним из признаков приближения к  $V_{bi}$  является экспоненциальный рост емкости [12], выглядящий прямой линией в логарифмическом масштабе, что больше всего прослеживается для образцов Ag\_1 и Ag\_2. Однако у образцов Al\_1 значения  $V_{bi}$ , полученные из зависимости  $C^{-2}/V$ , оказались близкими к значениям из зависимости  $C/V$  (рис. 4, б). Результаты расчетов для всех образцов приведены в табл. 2.

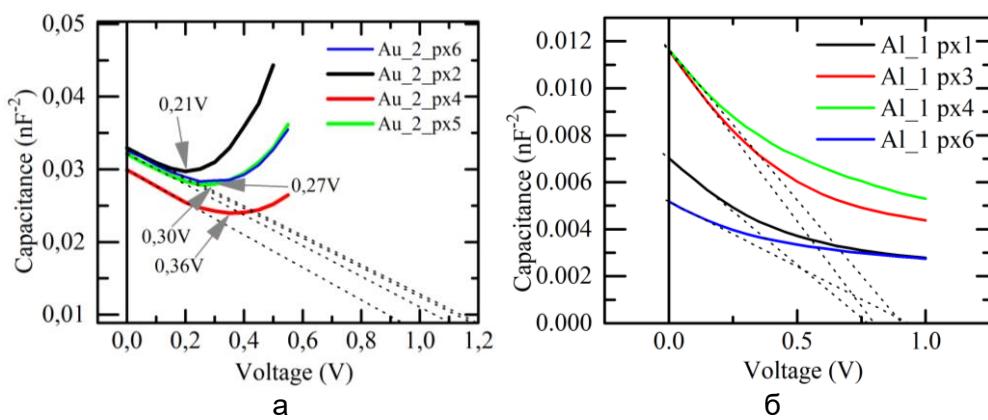
Рис. 4. Определение  $V_{bi}$  по  $C^{-2}/V$  зависимости; (а) образец Au\_2; (б) образец Al\_1

Таблица 2. Основные параметры СЭ

Образец	Au_1	Au_2	Al_1	Al_2	Al_3	Ag_1	Ag_2
Световое $R_{SH}$  темновое $R_{SH}$ ( $\Omega \cdot \text{см}^2$ )	154 140	145 150	235 437	245 264	627 1829	26,4 39,8	20,2 34,6
Световое $R_s$  темновое $R_s$ ( $\Omega \cdot \text{см}^2$ )	71 2	25 2,8	242 11	246 9,2	698 30,2	14,1 3,4	14 2,9
$V_{bi}$ (В) $C^{-2}/V C/V$	2,5–3,5 0,41	1,6 0,35	0,7 0,5–0,7	1,25 >1	3–6 ≈2	– 0,03	– 0,01
$N_D$ ( $\text{см}^{-3}$ )	$5,3 \cdot 10^{17}$	$3,0 \cdot 10^{17}$	$5,7 \cdot 10^{18}$	$9,1 \cdot 10^{18}$	$6,7 \cdot 10^{18}$	–	–
PCE (%)	0,13	0,49	0,003	0,000006	0,009	0,77	0,2
Коэф. идеальности	7;24	10;22	33;56	91	23;43;62	9;17	23

**Заключение.** Данные, полученные из темновых  $J-V$  характеристик отражают собственные параметры устройств без влияния эффектов, возникающих при освещении. Отклонение параметров от световых может быть вызвано наличием большого числа дефектов, которые, при освещении, способствуют протеканию токов утечки, что наблюдается в виде уменьшающегося  $R_{SH}$ . Однако транспорт зарядов к электродам при освещении затрудняется, о чем говорит увеличение  $R_s$ .

При напряжении смещения меньше 10 В наклон темновой  $J-V$  характеристики, свойственный SCL току, который необходим для вычисления подвижности зарядов методом Мотта–Гурни достичь не удалось. Хотя наклон кривой иногда приближался или превышал два, это наблюдалось или в зоне экспоненциального роста, или из-за отсутствия коррекции на  $R_s$ . В связи с этим мы ограничились анализом коэффициента идеальности, значения которого для всех устройств оказались намного выше коэффициентов, характерных кремниевым диодам. Повышенное значение  $n$  связывают с рекомбинацией зарядов на гетеропереходе [13] и образованием неомических контактов [14]. Увеличение значения  $n$  коррелирует с падением эффективности устройств, поэтому высокое значение говорит о большом количестве дефектов устройства.

Значения  $V_{bi}$  для образца Al\_2 и Al\_3 оказались намного выше чем у Al\_1, что, в случае Al\_2 может быть связано с отсутствием слоя ZnO, и окислением контактного слоя, что привело к увеличению энергетического барьера между РЗНТ–PCBM и Al, в случае Al\_3 это также может быть связано с увеличением энергетического барьера из-

за окисления контактного слоя, но и из-за возможных дефектов на поверхности PEDOT:PSS малой толщины, что привело к увеличению барьера между ИТО и РЗНТ-PCBM. Значения  $V_{bi}$  у образцов Ag\_1 и Ag\_2 также может быть связано с окислением контактного слоя, так как серебро может медленно менять рабочую функцию с 4,3 до 5,0 эВ [15], что как раз соответствует рабочей функции ИТО (4,8 эВ). Алюминий же, при окислении, может менять рабочую функцию с 4,3 до 1,4 эВ.

Вычислнная концентрация носителей заряда растет с падением эффективности устройств, что, скорее всего, объясняется тем, что к искомой концентрации добавляется вклад, вызванный зарядом ловушечных состояний и накоплением основных носителей заряда, инжектированных с контактов [11]. Все исследованные устройства характеризуются высоким значением коэффициента идеальности, что говорит о доминирующем влиянии ловушечных состояний, вносящих большой вклад в значения  $N_D$ .

## Литература

1. Litvin A.P. et al. Ternary Composites with PbS Quantum Dots for Hybrid Photovoltaics // The Journal of Physical Chemistry C. – 2019. – V. 123. – № 5. – P. 3115–3121.
2. Gray J.L. et al. The physics of the solar cell // Handbook of photovoltaic science and engineering. – 2003. – V. 2. – P. 82–128.
3. Bernede J.C. Organic photovoltaic cells: history, principle and techniques // Journal of the Chilean Chemical Society. – 2008. – V. 53. – № 3. – P. 1549–1564.
4. Malliaras G.G. et al. Electrical characteristics and efficiency of single-layer organic light-emitting diodes // Physical Review B. – 1998. – V. 58. – № 20. – P. R13411.
5. Kumar P.M., Saranya R., Dutta S. Extraction of built-in potential of organic diodes from current-voltage characteristics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1704.03819.pdf>, своб.
6. Wolf M., Rauschenbach H. Series resistance effects on solar cell measurements // Advanced energy conversion. – 1963. – V. 3. – № 2. – P. 455–479.
7. Neamen D.A. Semiconductor physics and devices: basic principles. – New York, NY: McGraw-Hill, 2003. – 746 p.
8. Streetman B.G. Solid state electronic devices. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2016. – 621 p.
9. Kirchartz T. et al. Recombination via tail states in polythiophene: fullerene solar cells // Physical Review B. – 2011. – V. 83. – № 11. – P. 115209.
10. Cristea M.J. Capacitance-voltage profiling techniques for characterization of semiconductor materials and devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1011/1011.3463.pdf>, своб.
11. Manda P.K., Dutta S. Analytical and numerical modeling of capacitance voltage characteristics of organic solar cells [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/327858734\\_Analytical\\_and\\_numerical\\_modelling\\_of\\_capacitance\\_voltage\\_characteristics\\_of\\_organic\\_solar\\_cells](https://www.researchgate.net/publication/327858734_Analytical_and_numerical_modelling_of_capacitance_voltage_characteristics_of_organic_solar_cells), своб.
12. Brus V.V. et al. Capacitance Spectroscopy for Quantifying Recombination Losses in Nonfullerene Small-Molecule Bulk Heterojunction Solar Cells // Advanced Energy Materials. – 2016. – V. 6. – № 11. – P. 1502250.
13. Naby M.A. et al. Dependence of dark current on zinc concentration in  $ZnxCd1 - xS/ZnTe$  heterojunctions // Solar energy materials and solar cells. – 1993. – V. 29. – № 2. – P. 97–108.
14. Zekry Z., Eldallal G. Effect of MS contact on the electrical behaviour of solar cells // Solid-state electronics. – 1988. – V. 31. – № 1. – P. 91–97.
15. Lattante S. Electron and hole transport layers: their use in inverted bulk heterojunction polymer solar cells // Electronics. – 2014. – V. 3. – № 1. – P. 132–164.

УДК 681.782, 520.3

РАСЧЕТ МОДУЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОЛЯ СОЛНЕЧНОГО  
ТЕЛЕСКОПА-КОРОНОГРАФАОрехова М.К.<sup>1</sup>, Иванов С.Е.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н., доцент Бахолдин А.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены схемные решения зеркальных оптических систем модуля интегрального поля для солнечного телескопа-коронографа, ведущего работу в широком спектральном диапазоне (0,39–1,60 мкм). Дано описание метода спектроскопии интегрального поля. Показаны схемы одноступенчатого и двухступенчатого деления поля, приведены их достоинства и недостатки.

**Ключевые слова:** спектроскопия интегрального поля, панорамная спектроскопия, модуль интегрального поля, исследования Солнца, оптический делитель поля.

**Введение.** В текущий момент ведется разработка и уточнение характеристик систем для построения солнечного телескопа-коронографа с диаметром главного зеркала  $D=3$  м [1, 2]. Создаваемое оборудование позволит проводить наблюдения и измерения солнечной структуры с высоким спектральным ( $R\sim 300,000$ ) и пространственным ( $0,1''$ ) разрешением.

Как правило, классические длиннощелевые спектрометры состоят из входной щели, коллимационного объектива, диспергирующего элемента и проекционного объектива. В современных системах используют систему сканирования для расширения исследований двумерного объекта. Система сканирования за несколько наблюдений перемещается в плоскости, перпендикулярной плоскости щели, но за время ее перемещения атмосферные искажения изменяют изображение объекта, что влияет на качество получаемого изображения и в том числе неэффективно по времени для наблюдателя.

Спектроскопия интегрального поля (или панорамная спектроскопия) – это область в астрономии, которая позволяет собрать информацию о спектре двумерного поля с максимально высоким разрешением. Это происходит за счет оптического деления поля на пиксели, которые являются предметом для спектрометра. Таким образом, после прохождения спектрометра, на приемнике формируется информация о спектре каждого пикселя поля. Независимо от метода деления поля на выходе получается трехмерный куб данных (две пространственные координаты и одна спектральная) [3, 4].

На данный момент в мире ведется активная разработка оптических систем по методу панорамной спектроскопии, к которым относятся такие инструменты, как: MuSICa [5–7], MUSE [8–12], FISICa [13, 14]. На сегодняшний день не существует подобных реализованных систем для исследования Солнца в широком спектральном диапазоне (0,39–1,60 мкм).

**Спектроскопия интегрального поля.** Схематично метод интегрально-полевой спектроскопии представлен на рис. 1. Зеркальная система Грегори 2 формирует изображение части Солнца 1 диаметром 2'. Полевая диафрагма (ПД) 3 перед модулем интегрального поля 4 (МИП) «вырезает» в изображении поле прямоугольной формы размером  $1,2\times 2,3$  мм, что соответствует угловому размеру  $6\times 12''$  в пространстве предметов. Далее МИП 4 преобразует двумерное поле прямоугольной формы в набор длинных щелей 5, которые являются предметом для спектрометра 6. Спектрометр 6 в дальнейшем формирует спектральные изображения 7 исследуемой части Солнца в диапазоне длин волн 0,39–1,60 мкм.

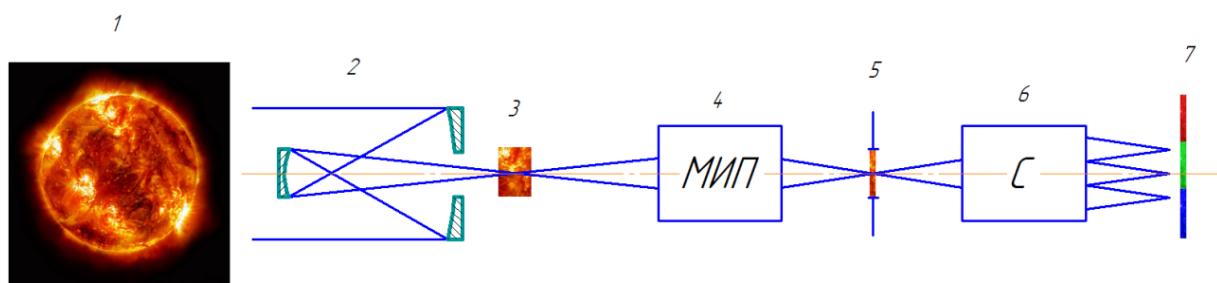


Рис. 1. Схема метода панорамной спектроскопии: 1 – исследуемый объект (Солнце); 2 – зеркальная система Грекори; 3 – ПД; 4 – МИП; 5 – набор длинных щелей; 6 – спектрометр; 7 – спектральные изображения щелей

Схема МИП может быть реализована одной ступенью или несколькими, в зависимости от решаемой задачи. Ограничения использования одной ступени связаны с размерами исследуемого поля и с количеством делений (отсюда – и с количеством приемников).

Предполагается, что МИП для солнечного телескопа-коронографа будет осуществлять деление изображения двумя ступенями. На рис. 2 показано поэтапное деление изображения первой ступенью: полевая диафрагма «вырезает» из всего поля телескопа прямоугольное изображение размером  $1,2 \times 2,3$  мм ( $6'' \times 12''$ ). Далее это изображение с помощью оптической системы МИП первой ступени, состоящей из плоских зеркал, расположенных под разными углами, делится на 8 субизображений размером  $0,15 \times 2,3$  мм ( $0,75'' \times 12''$ ), и каждое из субизображений направляется на вторую ступень деления поля.

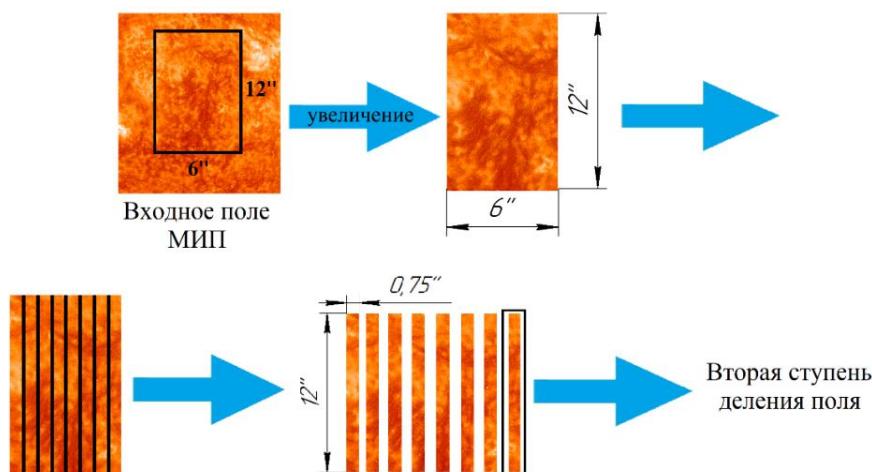


Рис. 2. Деление поля первой ступенью

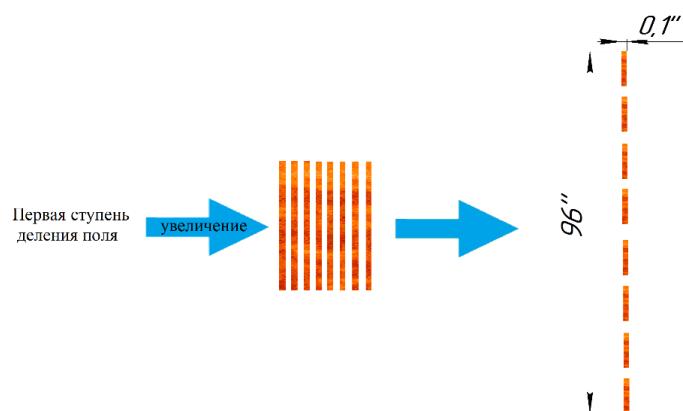


Рис. 3. Деление поля второй ступенью

Вторая ступень деления поля (рис. 3) также содержит массив плоских зеркал, установленных под различными углами. Однако после деления субизображения еще на 8 частей размером  $0,02 \times 2,3$  мм ( $0,1 \times 12''$ ) оптическая система МИП дополнительно реорганизует их расположение, формируя из частей субизображения длинную узкую щель размером  $0,02 \times 18,6$  мм ( $0,1 \times 96''$ ), подаваемую на вход спектрометра.

**Моделирование оптической системы модуля интегрального поля.** Прототип оптической схемы одноступенчатого деления поля представлен на рис. 4. Для деления изображения в фокальной плоскости телескопа устанавливаются плоские зеркала, расположенные под разными углами, которые отклоняют (и таким образом разделяют) изображение на равные части, располагая их друг за другом и формируя длинную щель, являющуюся предметом для спектрометра.

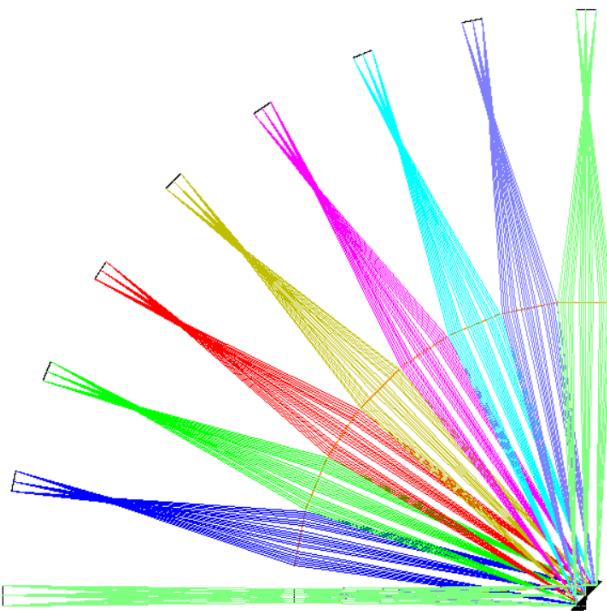


Рис. 4. Модель делителя поля второй ступени

Поскольку посредством оптических систем деления поля можно достигнуть высокого пространственного разрешения путем преобразования двумерного поля в набор узких длинных щелей размером  $0,02 \times 18,6$  мм ( $0,1 \times 96''$ ). Логика построения конструкции МИП и определение оптимальных размеров зеркал делителей диктует необходимость введения увеличителей между ступенями деления. На предварительном этапе планируется установка зеркальной системы с линейным увеличением  $-7^{\times}$ .

Главное достоинство применения одноступенчатой схемы МИП – простота решения. Однако с ее помощью невозможно осуществить деление изображения на большое количество субизображений, и, соответственно, пространственное разрешение в этом случае будет ниже. Для достижения более высокого пространственного разрешения возможно использовать двухступенчатую схему МИП, что рассмотрено далее. Для этого перед схемой деления поля, показанной на рис. 4, располагают дополнительную систему деления поля.

Дополнительная ступень деления поля оптически делит его на нужное количество равных частей, каждая из которых при помощи плоских зеркал отклоняется под определенным углом для последующей реализации второй ступени деления. Предварительная оптическая схема деления поля первой ступени показана на рис. 5.

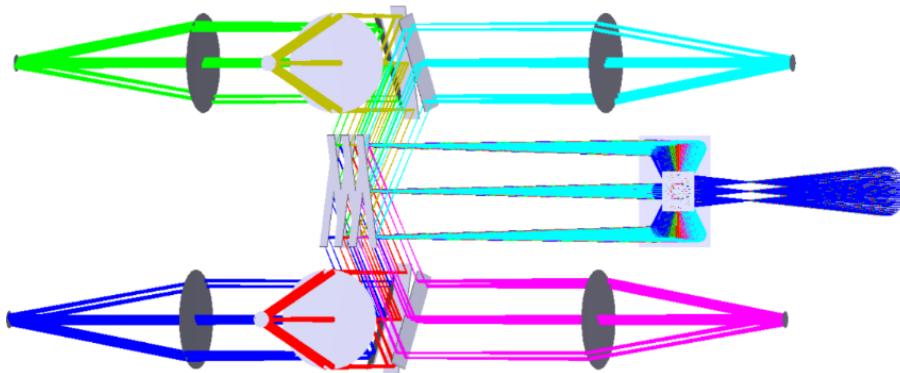


Рис. 5. Предварительная оптическая схема 1 ступени модуля интегрального поля (с использованием плоских зеркал)

Для оптического разбиения изображения на равные части возможно применить и иную схему, представленную на рис. 6, а. В данной системе для деления поля использованы параболические зеркала. «Вырезанный» диафрагмой из поля телескопа световой пучок отражается от массива плоских, расположенных на параболической кривой, зеркал (рис. 6, б). Далее разбитый на равные части пучок телескопа попадает на цельное параболическое зеркало для передачи его на вторую ступень деления поля.

Достоинством схемного решения, показанного на рис. 6, является меньшее количество компонентов, однако конструкция элементов – достаточно сложная. Их позиционирование в пространстве требует работы более высокого уровня. В том числе недостатком этой схемы является сложность изготовления поверхностей в связи их децентрировкой и асферизацией. Схемное решение, показанное на рис. 5, имеет большее количество оптических элементов, но его достоинством является их простота.

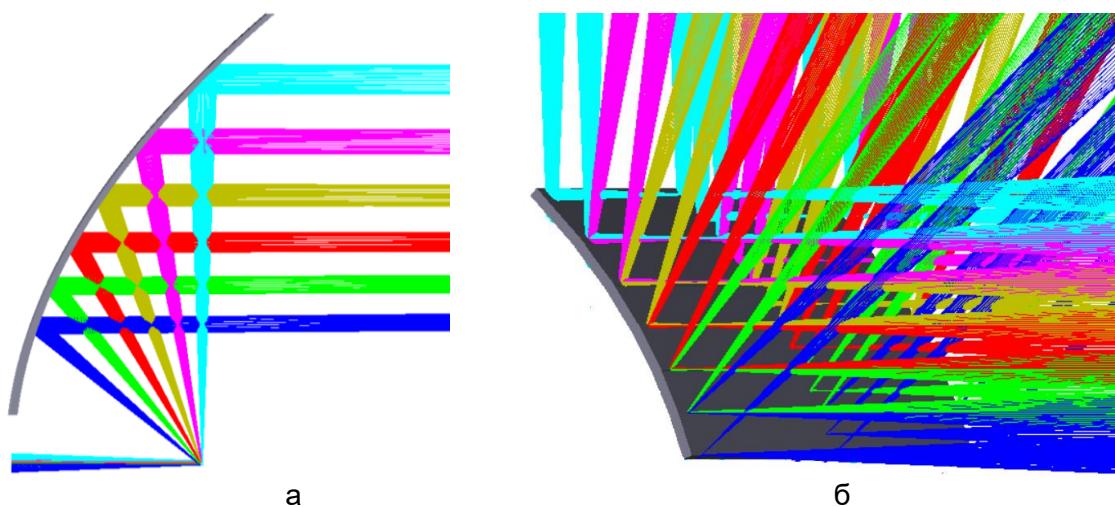


Рис. 6. Предварительная оптическая схема 1 ступени модуля интегрального поля (с использованием параболических зеркал)

**Заключение.** В работе представлено схемное решение оптической системы модуля интегрального поля для солнечного телескопа-коронографа. Рассмотрены схемы двухступенчатого деления поля. Приведены различные варианты использования оптических схем делителей поля: с использованием плоских и параболических зеркал, а также результаты их сравнения.

Использование предложенных схемных решений делает возможным построение оптической системы для получения спектральных изображений Солнца в широком спектральном диапазоне (0,39–1,60 мкм) с высоким спектральным разрешением ( $R \sim 300,000$ ).

**Литература**

1. Демидов М.Л., Григорьев В.М., Чупраков С.А., Колобов Д.Ю., Скоморовский В.И., Ковадло П.Г., Пуляев В.А. Проект национального российского крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м // X Российско-монгольская конференция «Солнечно-земная физика и сейсмогеодинамика Байкало-Монгольского региона». – 2015. – Вып. XIII. – С. 55–67.
2. Колобов Д.Ю., Григорьев В.М., Демидов М.Л., Чупраков С.А., Скоморовский В.И., Ковадло П.Г., Пуляев В.А. Национальный проект крупного солнечного телескопа: задачи и перспективы // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. – 2015. – С. 3–4.
3. Bacon R., Monnet G. Optical 3D-Spectroscopy for Astronomy. – John Wiley & Sons, 2017. – 296 p.
4. Mediavilla E., Arribas S., Roth M., Cepa-Nogu   J., Sánchez F. 3D Spectroscopy in Astronomy. Canary Islands Winter School of Astrophysics. – Cambridge University Press, 2010. – V. 17. – 271 p.
5. Calcines A., López R.L., Collados M. Musica: The multi-slit image slicer for the est spectrograph // Journal of Astronomical Instrumentation. – 2013. – V. 2. – № 01. – P. 1350009.
6. Calcines A., Collados M., López R.L. Feasibility study of high-resolution integral-field spectrographs for EST with multislit and multi-wavelength capabilities // Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III. – 2010. – V. 7735. – P. 77351X.
7. Calcines A. et al. MuSICA image slicer prototype at 1.5-m GREGOR solar telescope // Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V. – 2014. – V. 9147. – P. 91473I.
8. H  nault F. et al. Slicing the universe at affordable cost: the quest for the MUSE image slicer // Optical Design and Engineering. – 2004. – V. 5249. – P. 134–146.
9. Laurent F. et al. Optical design, manufacturing, and tests of the MUSE image slicer // Optical Fabrication, Testing, and Metrology II. – 2005. – V. 5965. – P. 59650J.
10. Laurent F. et al. MUSE integral field unit: test results on the first out of 24 // Modern Technologies in Space-and Ground-based Telescopes and Instrumentation. – 2010. – V. 7739. – P. 77394M.
11. Laurent F. et al. MUSE field splitter unit: fan-shaped separator for 24 integral field units // Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation. – 2014. – V. 9151. – P. 91511U.
12. Bonneville C. et al. Image slicer manufacturing: from space application to mass production // Optical Fabrication, Metrology, and Material Advancements for Telescopes. – 2004. – V. 5494. – P. 188–196.
13. Eikenberry S.S. et al. FISICA: the Florida image slicer for infrared cosmology and astrophysics // Ground-based Instrumentation for Astronomy. – 2004. – V. 5492. – P. 1264–1274.
14. Glenn P.E. et al. Design, fabrication, assembly, and testing of the Florida image slicer for infrared cosmology and astrophysics (FISICA) integral field unit // Ground-based Instrumentation for Astronomy. – 2004. – V. 5492. – P. 1254–1264.

УДК 621.373.8

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ПИКОСЕКУНДНОГО  
ЛАЗЕРА С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД****Петров А.Б.<sup>1</sup>, Одноблюдов М.А.<sup>2</sup>****Научный руководитель – к.ф.-м.н. Одноблюдов М.А.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В данной работе представлены результаты разработки волоконного лазера с длительностью импульса 48 пс, основанного на принципе пассивной синхронизации мод. Описан выбор схемы и подбор компонентов. Измерены и проанализированы основные характеристики выходного излучения, разработанного волоконного пикосекундного лазера.

**Ключевые слова:** волоконный лазер, пикосекундный лазер, оптическое волокно, активное волокно, синхронизация мод, насыщающийся поглотитель.

**Введение.** Синхронизация мод представляет собой метод создания в лазерном резонаторе ультракоротких импульсов с длительностью в диапазоне от пикосекунд до фемтосекунд. Основой этого метода является создание фазовой зависимости между продольными модами резонатора лазера. Интерференция между этими модами может вызывать генерацию лазерного излучения в виде последовательности импульсов. Импульсы с синхронизацией мод могут генерироваться активными или пассивными способами.

Разрабатываемый в данной работе лазер в последствии будет использоваться в качестве задающего генератора для высокомощного усилителя на основе активного тейперированного волокна, легированного иттербием [1]. Поэтому задачей было создать лазер с длиной волны в районе 1040 нм, длительностью импульса около 50 пс и выходной мощностью больше 50 мВт.

**Синхронизация мод в волоконных лазерах.** Активная синхронизация мод осуществляется при помощи внешнего сигнала, который обеспечивает амплитудную или фазовую модуляцию. Суть метода заключается в периодической модуляции потерь резонатора или изменении фазы при каждом обходе резонатора. Это может быть достигнуто при помощи акустооптических или электрооптических модуляторов Маха-Цендера, интегрально-оптических модуляторов или полупроводниковых электроуправляемых модуляторов. Если модуляция согласована с периодом обхода резонатора, это приводит к установлению режима синхронизации мод и генерации сверхкоротких импульсов.

В лазере с пассивной синхронизацией мод нелинейный элемент в резонаторе обеспечивает затухание по краям импульса с низкой интенсивностью излучения и минимальные потери для центральной части импульса с высокой интенсивностью. Нелинейным элементом, инициирующим пассивную синхронизацию мод, может быть насыщающийся поглотитель, изготовленный из различных полупроводниковых материалов [2], искусственный насыщающийся поглотитель, такой как нелинейный вращатель плоскости поляризации (NLPR) [3], нелинейное петлевое зеркало [4] или ячейка Керра [5]. В волоконных лазерах чаще всего используются полупроводниковые насыщающиеся поглотители.

**Полупроводниковые насыщающиеся поглотители.** Быстрый прогресс в области сверхбыстрых лазерных систем стал возможным благодаря развитию сложных полупроводниковых технологий, в частности разработке полупроводникового зеркала с насыщающимся поглотителем (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM).

Полупроводниковые насыщающиеся поглотители могут быть разработаны независимо от лазера, что позволяет оптимизировать лазерный резонатор и синхронизацию мод отдельно. SESAM состоит из Брэгговского зеркала и поглощающей области. Поглощающая область содержит одну или множество квантовых ям (QW), которые обеспечивают поглощение. Длину волны поглощения можно точно регулировать, контролируя глубину и ширину квантовых ям. Поглощающая область ограничена верхним Брэгговским зеркалом, которое усиливает нелинейность в резонаторе Фабри-Перо. Отражающая способность SESAM увеличивается с увеличением входного светового потока, что обеспечивает формирование мощного импульса. При увеличении количества квантовых ям глубина модуляции возрастает. Другим важным параметром для насыщающегося поглотителя является его время восстановления поглощения.

**Схема волоконного пикосекундного лазера.** На рис. 1 представлена схема линейного волоконного лазера с синхронизацией мод при помощи SESAM с одним каскадом усиления. Зеркалами резонатора в такой схеме являются волоконное кольцевое зеркало и SESAM.

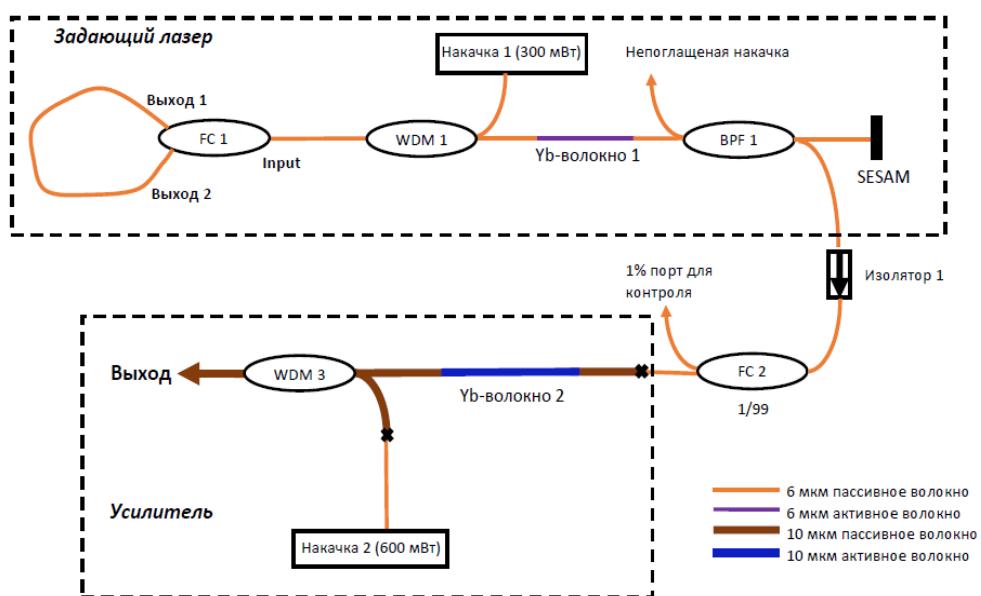


Рис. 1. Схема волоконного пикосекундного лазера с одним усилительным каскадом.

FC – сплавной разветвитель; WDM – мультиплексор; BPF – гибридный фильтр/разветвитель

Данная схема основана на принципе волоконно-оптического лазера с нормальной дисперсией (ANDi, от англ. All Normal Dispersion) [6]. В лазере ANDi отсутствует элемент компенсации дисперсии, который можно найти в более традиционных волоконных лазерах с синхронизацией мод. Существуют три основных фактора, определяющих длительность импульса в лазере ANDi: полная дисперсия, нелинейный сдвиг фазы за один проход резонатора и ширина полосы спектрального фильтра. Уменьшение дисперсии и увеличение фазового сдвига приводят к более коротким импульсам. Ширина полосы спектрального фильтра должна быть выбрана близкой к ожидаемой спектральной ширине. Дисперсия может быть уменьшена путем сокращения длины волокна в любом месте резонатора. Сдвиг фазы также может быть увеличен за счет более интенсивной накачки, добавления большего количества волокна после активного волокна, где оптическая интенсивность высока, минимизация потерь в резонаторе. Однако укорачивание резонатора увеличивает частоту повторения и, следовательно, снижает энергию импульса и нелинейность. Невозможно изменить

дисперсию независимо, не влияя на нелинейность. Нелинейность же может быть настроена независимо путем изменения мощности накачки.

Активной средой волоконных лазеров является активное волокно, легированное редкоземельными элементами. В зависимости от необходимой длины волны используются эрбий, иттербий, тулий и др. В нашем случае было необходимо получить длину волны в районе 1040 нм, поэтому используется одномодовое активное волокно, легированное ионами иттербия, поглощение которого на длине волны 976 нм составляет примерно 250 дБ/м.

Разработанный лазер состоит из лазерного диода накачки на длине волны 976 нм мощностью 300 мВт, активного волокна, легированного иттербием, объединителя сигнала и накачки (WDM), а также гибридного полосового фильтра-разветвителя (BPF) с коэффициентом деления 70/30 и шириной пропускания 6 нм с центральной длиной волны 1040 нм. В лазере также присутствует волоконный делитель 99/1 для мониторинга параметров работы. В качестве одного из зеркал резонатора лазера используется так называемое кольцевое зеркало, которое основано на волоконно-оптическом делителе 50/50, два выходных порта которого свариваются между собой, образуя петлю. Таким образом свет попадает в один из входных портов, но не выходит из элемента, а через петлю возвращается обратно на этот порт. Зеркало является 100% в случае, если используется делитель 50/50.

В качестве второго зеркала резонатора выступает SESAM с глубиной модуляции 29%, временем релаксации 1 пс и рабочей длиной волны в диапазоне 980–1060 нм.

Усилитель состоит из диода накачки на длине волны 976 нм мощностью 600 мВт, активного волокна, легированного иттербием и объединителя сигнала и накачки. Предусилитель состоит из компонентов на 10 мкм волокнах, что позволяет повысить коэффициент усиления и тем самым получить на выходе излучение большей мощности, а также снизить вероятность возникновения нелинейных эффектов (Рамановского рассеяния) при увеличении пиковой мощности усиленного сигнала.

**Измерение основных параметров волоконного пикосекундного лазера.** Задающий лазер в режиме пассивной синхронизации мод генерирует оптические импульсы пикосекундной длительности с фиксированной частотой следования, определяемой длиной резонатора и групповой скоростью импульсов. Спектральная интенсивность устанавливает минимальную длительность импульса. Чем шире спектр, тем короче может быть импульс. Минимальная длительность импульса достигается, когда все частоты в спектре находятся в фазе, однако обычно импульс длиннее минимальной длительности. Это называется фактической длительностью импульса. Импульс длиннее, поскольку спектральная фаза не является постоянной, а изменяется по всему спектру, что вызвано дисперсией и нелинейностью. Импульс может быть сжат, если он длиннее минимальной длительности. В данной работе задачей было получить пикосекундные импульсы, поэтому необходимо минимизировать длительность сжимаемого импульса. Для этого необходимо максимизировать спектральную ширину.

На рис. 2, а показаны спектры выходного излучения волоконного пикосекундного лазера.

Ширина спектра (FWHM) составляет 0,9–1,6 нм в зависимости от мощности накачки. Центральная длина волны находится в диапазоне 1037–1038 нм, что соответствует ожидаемой при разработке длине волны в районе 1040 нм.

На рис. 2, б показана автокорреляционная функция импульса лазера. FWHM составляет 74 пс. В волоконных лазерах, основанных на синхронизации мод, форма импульса имеет форму квадрата гиперболического секанса ( $\text{sech}^2$ ). Для импульсов такой формы фактическая длительность импульса определяется как FWHM

автокорреляционной функции, умноженная на коэффициент 0,65. Соответственно фактическая длительность импульса разработанного лазера составила  $\sim 48$  пс.

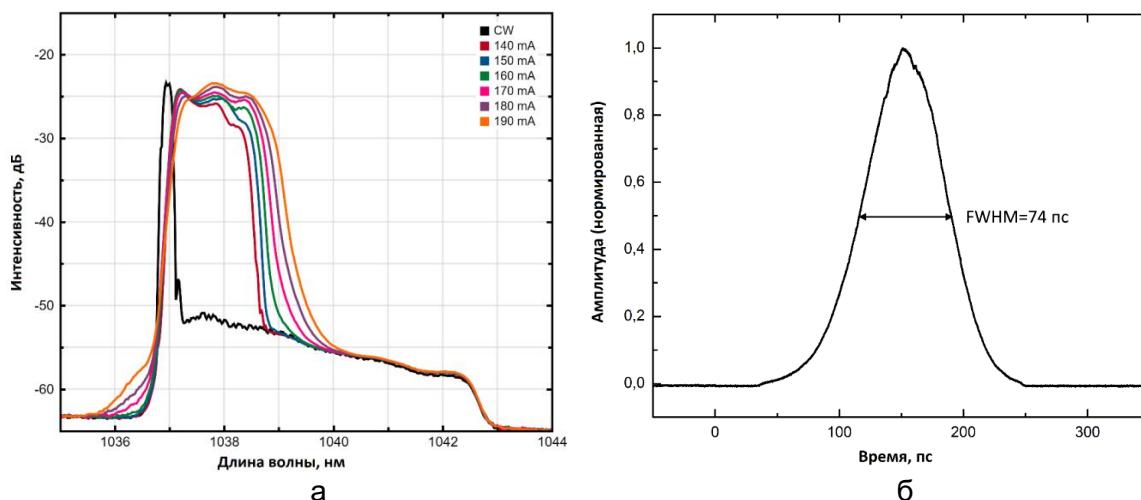


Рис. 2. Спектральная характеристика (а); автокорреляционная функция (б)

На рис. 3, а представлен радиочастотный спектр волоконного пикосекундного лазера.

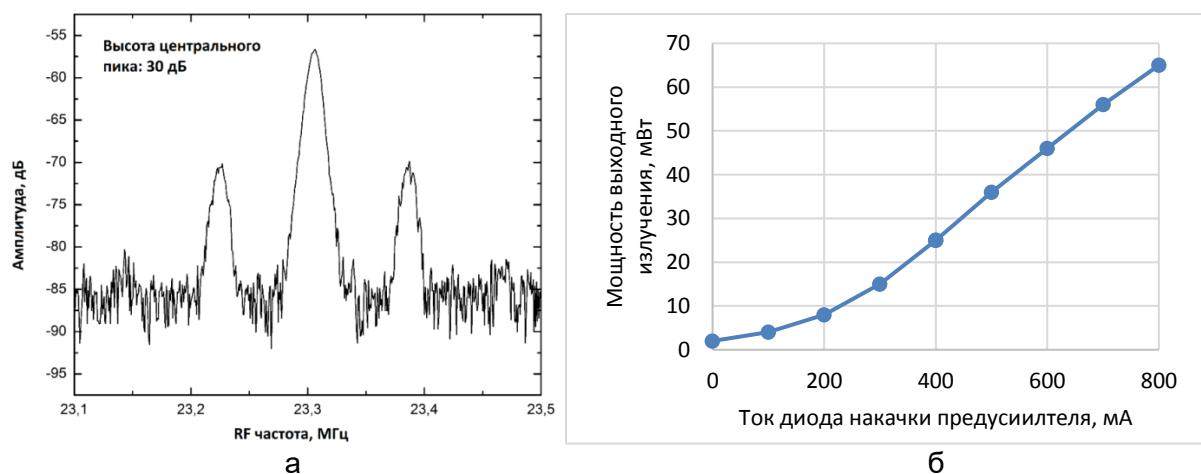


Рис. 3. Радиочастотный спектр (а); выходная мощность пикосекундного лазера после усилителя (б)

Из радиочастотного спектра следует, что полученная частота следования оптических импульсов в лазере составляет 23,3 МГц, высота центрального пика 30 дБ.

Выходная мощность непосредственно из задающего лазера при рабочем токе 130 мА составляет примерно 2 мВт. Зависимость же выходной мощности от силы тока накачки после усилителя представлена на рис. 3, б.

Мощность усилителя достигает 65 мВт при накачке 800 мА, что достаточно для дальнейшего усиления в активных тейперированных волокнах.

**Заключение.** В результате выполнения данной работы был разработан волоконный пикосекундный лазер, основанный на пассивной синхронизации мод. В работе описан принцип действия лазеров подобного типа, а также представлены основные характеристики выходного оптического излучения разработанного лазера. Центральная длина волны лазера составила 1037 нм, частота 23,3 МГц, длительность импульса 48 пс.

Данная работа поддержана Минобрнауки России (проекты №16.4959.2017/6.7 и 16.3788.2017/4.6).

**Литература**

1. Fedotov A. et al. High power picosecond MOPA with anisotropic ytterbium-doped tapered double clad fiber // Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications. – 2018. – V. 10683. – P. 106831O.
2. Keller U. et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers // IEEE Journal of selected topics in QUANTUM ELECTRONICS. – 1996. – V. 2. – № 3. – P. 435–453.
3. Matsas V., Newson T., Richardson D., Payne D. Self-starting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation // Electron. Lett. 28. – 1992 – P. 1391–1393.
4. Duling I.N. All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror // Optics letters. – 1991. – V. 16. – № 8. – P. 539–541.
5. Brabec T. et al. Kerr lens mode locking // Optics letters. – 1992. – V. 17. – № 18. – P. 1292–1294.
6. Chong A., Renninger W.H., Wise F.W. Properties of normal-dispersion femtosecond fiber lasers // JOSA B. – 2008. – V. 25. – № 2. – P. 140–148.

УДК 681.7.08

**ИССЛЕДОВАНИЕ АНАМОРФОТНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ  
ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ УГЛОМЕСТНОЙ ОСИ  
РАДИОТЕЛЕСКОПА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

Пихота Н.С.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Коняхин И.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

Исследования в диапазоне миллиметровых длин волн требуют высокой точности положения зеркальных компонентов радиотелескопа. Вес зеркала является причиной угловых деформаций угломестной оси. В результате, угловое положение оси параболического зеркала радиотелескопа не равно исходным значениям. Для измерения изменений угла скручивания используется автоколлимационная система с отражателем в виде комбинации анаморфотной системы клиньев и тетраэдрического рефлектора. Обсуждается новый метод измерения угла скручивания. Приведены уравнения статистической характеристики измерительной системы. Исследовано влияние поворота анаморфотной системы на измерение угла скручивания.

**Ключевые слова:** автоколлиматор, измерение угла скручивания, тетраэдрический отражатель, анаморфотная призма, радиотелескоп, система клиньев.

**Введение.** В настоящее время новые радиоастрономические приборы предназначены для исследований в миллиметровом диапазоне. Например, радиотелескопы Sardinia SRP (Италия) с диаметром зеркала 64 м, NRAORT (Япония) с диаметром зеркалом 45 м и RT-70 Suffa (Россия) с зеркалом диаметра 70 м.

Необходимо реализовать точность определения углового положения между элементами конструкции радиотелескопа. Исследование в диапазоне миллиметровых волн требует небольшого (не более 2 угл. сек) отклонения оси параболического зеркала относительно теоретического значения. Вес конструкции и температурное воздействие являются причинами деформаций компонентов радиотелескопа. Например, угловые деформации угломестной оси имеют значения 6–30 угл. мин [1].

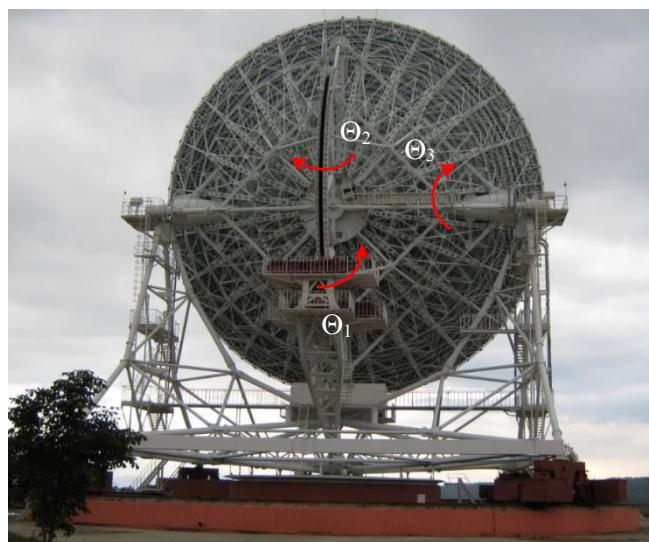


Рис. 1. Трехмерная деформация угломестной оси

Вес параболического зеркала является причиной угловой деформации положения угломестной оси относительно теоретического значения. Трехмерная деформация – это отклонения коллимационных углов  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  и угла скручивания  $\Theta_3$  угломестной оси (рис. 1). В результате, направление угломестной оси параболического зеркала после установки не соответствует значениям, которые определены в системе электропривода на подшипниках оси. Эта деформация оси должна быть измерена и исправлена.

Поэтому необходимо реализовать специальную систему для измерения угловой деформации угломестной оси параболического зеркала.

Для решения поставленной задачи оптимально будет использовать оптико-электронные автоколлиматоры, позволяющие проводить быстрые и высокоточные измерения, автоматизировать процесс снятия показаний и повысить надежность получаемой информации.

**Структура углаизмерительной системы.** При использовании оптико-электронных автоколлиматоров для дистанционного определения угловой деформации, измерительная система располагается на жестком основании. Фиксированная система координат  $XYZ$  связана с жестким основанием и объективом автоколлиматора. Подвижная система координат  $X_1Y_1Z_1$ , оси которой параллельны соответствующим осям фиксированной системы координат, а начало координат  $O_1$  совпадает с контрольной точкой в исходном состоянии, связана с контролируемым объектом (рис. 2). Фиксированная система координат обычно ориентирована таким образом, что одна из осей (например, ось  $OZ$ ) параллельна оси объектива и воображаемой линии, соединяющей контрольные точки на объекте и жестком основании.

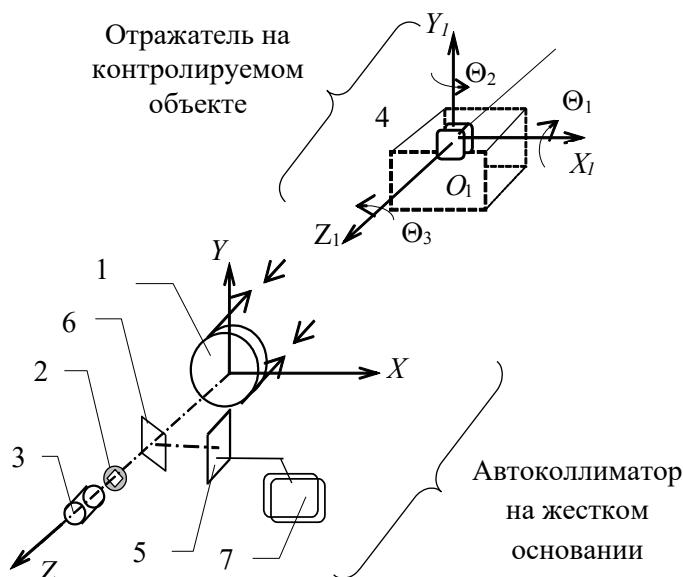


Рис. 2. Структура измерительной системы: 1 – объектив; 2 – апертура метки; 3 – источник оптического излучения; 4 – отражатель; 5 – фотоприемная матрица; 6 – светоделительный элемент; 7 – микропроцессорная система

После углового смещения контролируемого объекта параллельность соответствующих осей в двух системах координат нарушается. Угловое пространственное смещение объекта в контрольной точке  $O_1$  определяется группой параметров, которая включает в себя три угловые координаты  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  объекта. Эти координаты являются значениями для трех последовательных поворотов системы координат  $X_1Y_1Z_1$ , в результате чего оси этой системы перемещаются из своего исходного положения в текущее положение после углового рассогласования. Угол поворота  $\Theta_1$  относительно оси  $O_1X_1$ , угол поворота  $\Theta_2$  относительно оси  $O_1Y_1$  – коллимационные углы, а угол поворота  $\Theta_3$  относительно оси  $O_1Z_1$  – угол скручивания.

Для измерения угловых деформаций эффективно использовать автоколлиматор. Преимущество метода автоколлимационного измерения заключается в пассивном режиме работы, при котором активные элементы не устанавливаются на контролируемом объекте, а только пассивный элемент в виде призмы или зеркальной

системы находится в контрольной точке. В состав автоколлимационно-измерительной системы входят отражатель, расположенный на контролируемом элементе, и оптико-электронный автоколлиматор, расположенный на жестком основании [2].

Когда отражатель 4 поворачивается на углы  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  и  $\Theta_3$ , отраженный луч отклоняется от исходного направления. В результате изображение смещается и изменяется распределение яркости на матричном фотоприемнике. Микропроцессор 7 обрабатывает видеокадры, полученные от матричного фотоприемника, и определяет параметры изображения. Три угловые координаты  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$  отражателя 4 определяются в результате обработки параметров изображения на матричном фотоприемнике 7.

**Определение проблемы.** Измерение угла скручивания угломестной оси требует проведения высокоточных измерений с погрешностью не более 2 угл. сек ( $10^{-5}$  рад). Диапазон измерения составляет несколько градусов для угла скручивания (порядка  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  рад). Рабочее расстояние определяется половиной длины угломестной оси, значение которой для радиотелескопа RT-70 Suffa составляет 10 м.

Основная метрологическая проблема состоит в измерении угла скручивания  $\Theta_3$ . Необходимо использовать узкий отраженный пучок, потому что внутренний диаметр трубы угломестной оси составляет 50 мм и менее.

В результате необходимо синтезировать отражающий элемент для автоколлимационных измерений, благодаря которому будут выполняться следующие условия:

1. автоколлиматор с этим отражателем сможет измерять угол скручивания  $\Theta_3$ ;
2. отраженный пучок коллимационный и узкий.

Предлагается реализовать отражатель, который состоит из двух частей, лежащих на одной оси. Первая часть – анаморфотная система клиньев, а вторая часть – тетраэдрический ретрорефлектор.

#### Измерение угла скручивания при использовании анаморфотного элемента.

Первая часть предлагаемого отражателя – анаморфотная система клиньев. Анаморфотные оптические элементы изменяют высоту или ширину падающего пучка вдоль одного направления на точно определенную величину [3]. Анаморфотная система клиньев расширяет или сжимает падающий коллимационный пучок в плоскости меридиана. В результате масштаб формируемого изображения изменяется вдоль одной из осей. Пусть апертура метки в излучающем канале автоколлиматора имеет форму квадрата с диагональю  $a$  и угловыми коэффициентами  $k$  (рис. 3, а):

$$k = \operatorname{tg}(\alpha). \quad (1)$$

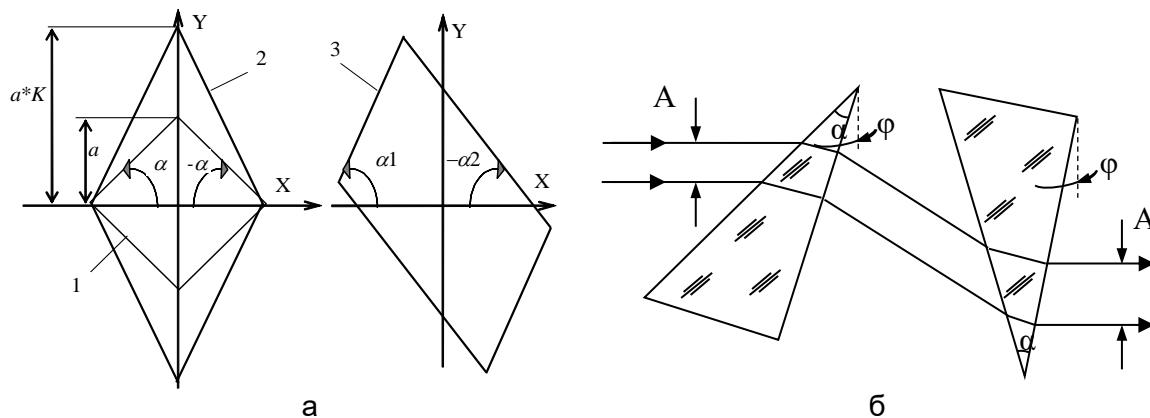


Рис. 3. Анаморфотное трансформирование изображения: 1 – апертура метки; 2 – изображение метки; 3 – изображение метки при наличии угла скручивания  $\Theta_3=20^\circ$  (а); анаморфотная система на основе двух клиньев (б)

Анаморфотная система клиньев преобразует пучок с увеличением  $K$  и формирует изображение на матрице фотоприемника в виде ромба с диагональю  $a \cdot K$  (рис. 3, б).

Если анаморфотный компонент повернуть относительно оси падающего пучка на угол скручивания  $\Theta_3$ , то изображение метки тоже будет вращаться. В результате форма изображения изменится. Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  трансформированного изображения метки будут определяться уравнениями:

$$k_1 = \operatorname{tg}(\alpha_1) = \frac{s + k \left[ \frac{K+1}{K-1} + \cos(2\Theta_3) \right]}{cs + ks}, \quad (2)$$

$$k_2 = \operatorname{tg}(-\alpha_2) = \frac{s - k \left[ \frac{K+1}{K-1} + \cos(2\Theta_3) \right]}{cs - ks}. \quad (3)$$

Разница  $\Delta k$  между коэффициентами  $k_1$  и  $k_2$  может быть использована в качестве параметра формы изображения:

$$\Delta k = k_1 - k_2 = \operatorname{tg}(\alpha_1) - \operatorname{tg}(-\alpha_2) = 2kK \frac{s - k \left[ \frac{K+1}{K-1} + \cos(2\Theta_3) \right]}{(cs)^2 - k^2 s^2}. \quad (4)$$

Параметры  $s$  и  $cs$  являются вспомогательными функциями:

$$s = \sin(2\Theta_3), \quad (5)$$

$$cs = \frac{K+1}{K-1} - \cos(2\Theta_3). \quad (6)$$

Микропроцессор обрабатывает видеокадр и определяет параметр  $\Delta k$  формы изображения. Угол скручивания  $\Theta_3$  определяется как решение уравнения (4).

**Моделирование влияния поворота анаморфотной системы на измерение угла скручивания.** Предлагается использовать анаморфотную телескопическую систему, состоящую из двух оптических клиньев с воздушным зазором (рис. 3, б). Обычно используются призмы с антиотражающим покрытием. Изменяя углы наклона призм  $\phi_a$  и  $\phi_b$  можно варьировать анаморфотное увеличение от  $2^\times$  до  $6^\times$ . Оптимальным по конструкции анаморфотного компонента будет использование призм, при использовании которых увеличение изображения составит  $3^\times$ . Система призм с углом вершины  $\alpha=29,43^\circ$ , показателем преломления стекол  $n=1,765$ , углами наклонов призм  $\phi_a=30,7^\circ$  и  $\phi_b=0^\circ$ , даст увеличение изображения равное  $3,059^\times$  [3].

Поворот анаморфотной системы относительно осей, перпендикулярных оси скручивания, приводят к изменению хода лучей через клинья и, следовательно, могут являться источником погрешности измерения угла скручивания. Для определения влияния поворота анаморфотной системы на измерение угла скручивания  $\Theta_3$  проводилось моделирование и расчет системы в среде Mathcad по следующему алгоритму:

1. рассчитывалось изменение угла падения при повороте анаморфотной системы с шагом 100 угл. мин;
2. исследовалась зависимость значения анаморфотного увеличения при повороте анаморфотной системы;
3. исследовалось влияние поворота анаморфотной системы на точность измерения угла скручивания.

В результате моделирования было описано изменение анаморфотного увеличения в результате поворота анаморфотной системы, а также влияние этого поворота на ошибку измерения угла скручивания (рис. 4).

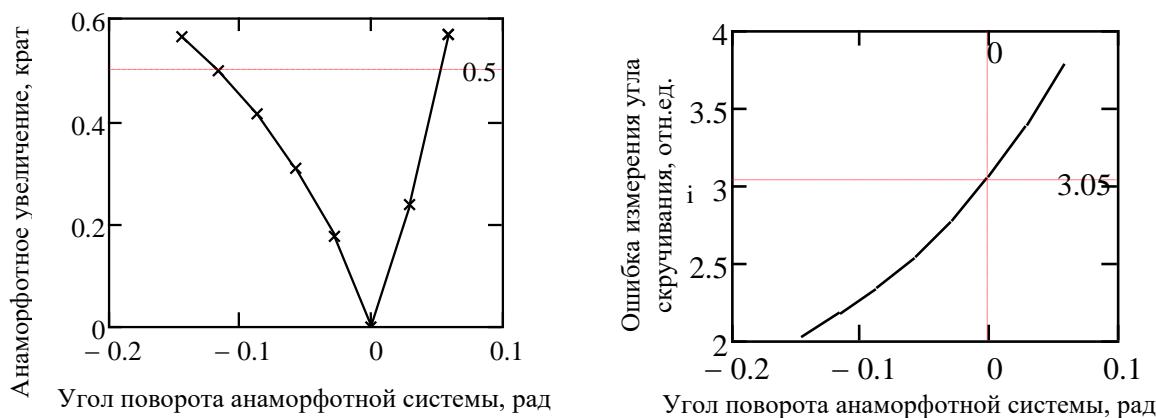


Рис. 4. Влияние поворота анаморфотной системы на анаморфотное увеличение и ошибку измерения угла скручивания

Таким образом, для реализации проведения высокоточных измерений в диапазоне миллиметровых волн с погрешностью не более 2 угл. сек. необходимо обеспечить точность установки анаморфотной системы по коллимационному углу  $\Theta_1$  с погрешностью не более 5 угл. сек.

**Заключение.** В ходе исследования оптико-электронной системы измерения угловой деформации угломестной оси радиотелескопа миллиметрового диапазона было предложено использовать автоколлиматор с отражателем, который состоит из анаморфотной системы клиньев и тетраэдрического ретрорефлектора. Данная система позволяет проводить вычисления угла скручивания. Однако, было выявлено, что измерительная система очень чувствительна к повороту анаморфотной системы относительно рассчитанных значений. Следовательно, необходимо с высокой точностью устанавливать анаморфотную систему клиньев в угломестной оси радиотелескопа во избежание ошибки измерения угла скручивания.

### Литература

1. Konyakhin I., Artemenko Y., Timofeev A. Control of the deformation for the millimeter wave range radiotelescope mirrors // Fifth International Symposium on Instrumentation Science and Technology. – 2009. – V. 7133. – P. 7133R.
2. Konyakhin I.A. et al. Optic-electronic systems for measuring the angle deformations and line shifts of the reflecting elements at the rotateable radio-telescope // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII. – 2011. – V. 8082. – P. 80823R.
3. Vanderwerf D. Applied prismatic and reflective optics. – SPIE Press monograph; 200, Bellingham&Washington. – 2010. – 297 p.

УДК 532.42, 532.326

## РАЗРАБОТКА АКУСТООПТИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ МИКРООБЪЕКТОВ

Пичугина Ю.В.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.ф.-м.н., в.н.с. Мачихин А.С.<sup>1</sup><sup>1</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

Оптические пинцеты широко используются в биофизике, цитологии, физике твердого тела и других областях науки и техники. В большинстве существующих оптических пинцетов для управления положением световой ловушки используют зеркальные и зеркально-линзовые системы. Такие системы не позволяют быстро перемещать ловушку из одной произвольной точки поля зрения в другую из-за высокой инерционности систем перемещения зеркал и линз. В данной работе рассматривается акустооптическое сканирование, характеризующееся высокой точностью и возможностью независимого управления несколькими оптическими ловушками при манипулировании микрообъектами с помощью оптического пинцета. Брэгговская дифракция света на ультразвуковой волне позволяет создавать надежные твердотельные устройства для точного и быстрого отклонения лазерного луча. Описана схема оптического пинцета с двухкоординатным сканированием, реализованная двумя последовательными акустооптическими ячейками.

**Ключевые слова:** оптический пинцет, оптическая ловушка, акустооптический дефлектор, акустическая волна, брэгговская дифракция.

**Введение.** В настоящее время разработка, изучение и использование оптических пинцетов вызывают большой научный и практический интерес [1–3]. Оптический пинцет представляет собой оптический инструмент, который позволяет манипулировать микроскопическими объектами с помощью лазерного излучения. Данный метод основан на возможности фокусировки лазерного излучения, в котором пространственно неоднородное оптическое поле вблизи перетяжки сильно сфокусированного лазерного луча формирует эффективную пространственную потенциальную яму.

Ключевым элементом оптического пинцета является система сканирования, предназначенная для управления пучком и его параметрами [4, 5]. В большинстве существующих оптических пинцетов для управления положением световой ловушки используют зеркальные и зеркально-линзовые системы. Такие системы не позволяют быстро перемещать ловушку из одной произвольной точки поля зрения в другую из-за высокой инерционности систем перемещения зеркал и линз, а к юстировке схем на основе таких систем предъявляются высокие требования, что ведет к необходимости использовать дорогие и сложные приводные механизмы и делает невозможным создание нескольких световых ловушек одновременно. Системы управления, в основе которых лежат жидкокристаллические модуляторы оптического излучения, лишены некоторых недостатков, свойственных зеркальным и зеркально-линзовым системам, однако обладают низким быстродействием. В сравнении с известными системами манипулирования, акустооптический (АО) дефлектор характеризуется на порядок более высоким быстродействием, возможностью независимого управления несколькими оптическими ловушками, мгновенным, высокоточным, адресным (скаккообразным) перемещением ловушки в пределах поля зрения.

В данной работе рассматривается двухкоординатная АО сканирующая система для немеханического манипулирования микрообъектами с помощью оптического пинцета. В АО системе положение ловушки определяется только частотами акустических волн, возбуждаемых в кристаллах. Скорость настройки ограничена в основном временем прохождения акустической волны в кристалле, которое обычно составляет несколько микросекунд [6].

Полученные результаты показывают преимущества и перспективы АО немеханического манипулирования микрообъектами с помощью оптического пинцета.

**Схема установки.** Схема оптического пинцета для манипулирования микрообъектами с помощью двумерного АО сканирования показана на рис. 1. Диаметр лазерного луча увеличивается с помощью расширителя пучка, и после направлен к двухкоординатному акустооптическому дефлектору, который представляет собой две одинаковые и развернутые на  $90^\circ$  АО ячейки. Первая АО ячейка отклоняет лазерный луч в меридиональной плоскости, вторая – в сагиттальной плоскости. Диаметр пучка при этом не изменяется. Система линз необходима для сопряжения АО ячеек и микрообъектива, который фокусирует лазерное излучение на исследуемый образец, расположенный на предметном столике инвертированного микроскопа. Двигая последнюю линзу можно перемещать перетяжку лазерного излучения вдоль оси, т.е. выполнять фокусировку пучка. Цифровая камера с микроскопической системой визуализации размещена на противоположной стороне образца, и позволяет в режиме реального времени наблюдать и контролировать положение световой ловушки.

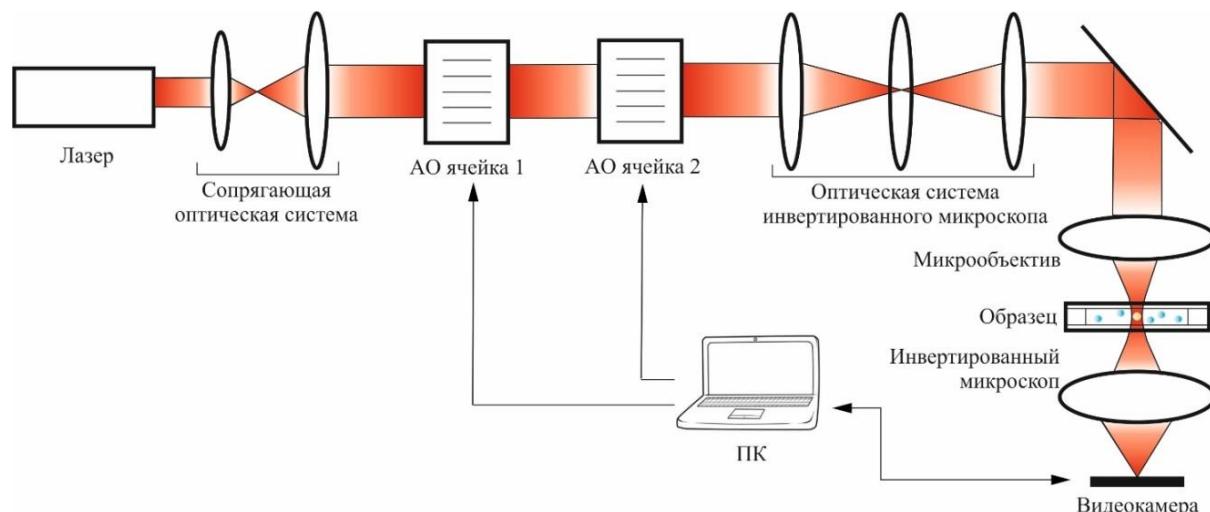


Рис. 1. Схема оптического пинцета

**Акустооптический дефлектор.** АО ячейка представляет собой кристалл пирателлурита  $\text{TeO}_2$ , к одной из граней которого прикреплен пьезопреобразователь. При подаче напряжения на пьезопреобразователь в кристалле распространяется акустическая волна, которая создает динамическую дифракционную решетку для лазерного пучка, проходящего через кристалл [7]. Изменяя подаваемую на АО ячейку частоту ультразвука, первый дифракционный максимум лазерного пучка отклоняется на контролируемые углы. Возбуждение звуковых волн происходит при подаче сигналов от электронного драйвера на электроды. Драйвер состоит из генератора и широкополосного усилителя. Для реализации режима бегущей звуковой волны к противоположной грани кристалла прикреплен акустический поглотитель. Быстрая модуляция приводит к тому, что оптическая ловушка переключается между разными положениями, т.е. создается несколько ловушек. Схематическая конструкция и состав однокоординатной АО сканирующей системы в режиме дифракции Брэгга показан на рис. 2, а.

Для двумерного пространственного сканирования дефлектор состоит из двух последовательных АО ячеек, повернутых на  $90^\circ$ . На рис. 2, б показана схема двухкоординатного дефлектора с двухканальным электронным драйвером.

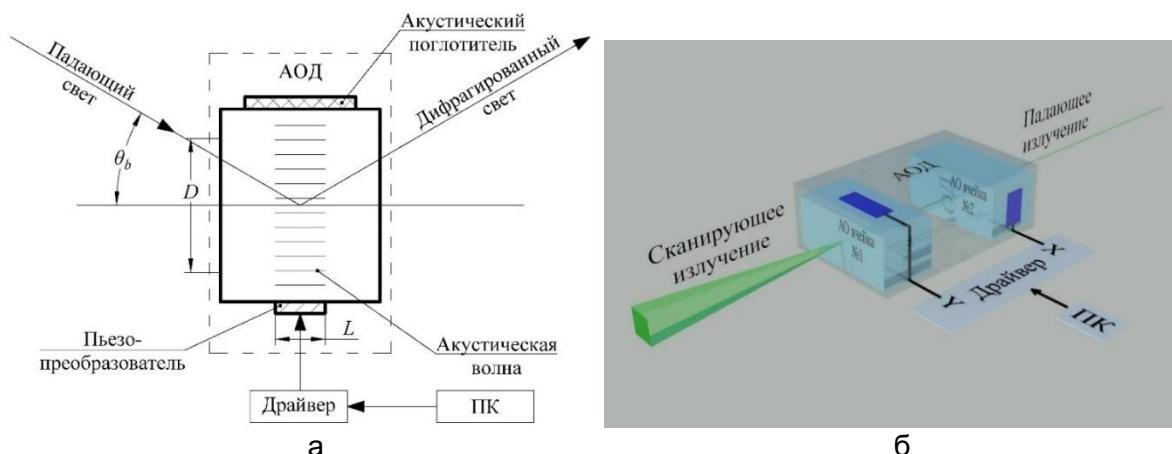


Рис. 2. АО ячейка дефлектора:  $L$  – длина акустооптического взаимодействия;  $D$  – апертура излучения;  $\theta_b$  – угол Брэгга (а); схема двухкоординатной сканирующей АО системы (б)

Для этого исследования мы разработали двухкоординатную сканирующую АО систему, состоящую из двух идентичных ячеек из кристаллов  $\text{TeO}_2$ . Каждая из них работает в режиме анизотропной дифракции Брэгга. Разработанный дефлектор имеет типичную конфигурацию: угол падения света в кристалле  $\theta_0=5,6^\circ$  и длину акустооптического взаимодействия  $L=2$  мм. Медленная сдвиговая акустическая волна в кристалле распространяется в плоскости (001) под углом  $\alpha=7,5^\circ$  к направлению [110] (рис. 3, а). Вектор звуковой волны  $\mathbf{q}$  направлен под углом  $\gamma=91,5^\circ$  к оси [110] и касательной к поверхности показателей преломления дифракционного света. Векторная диаграмма этого типа АО дифракции показана на рис. 3, б.

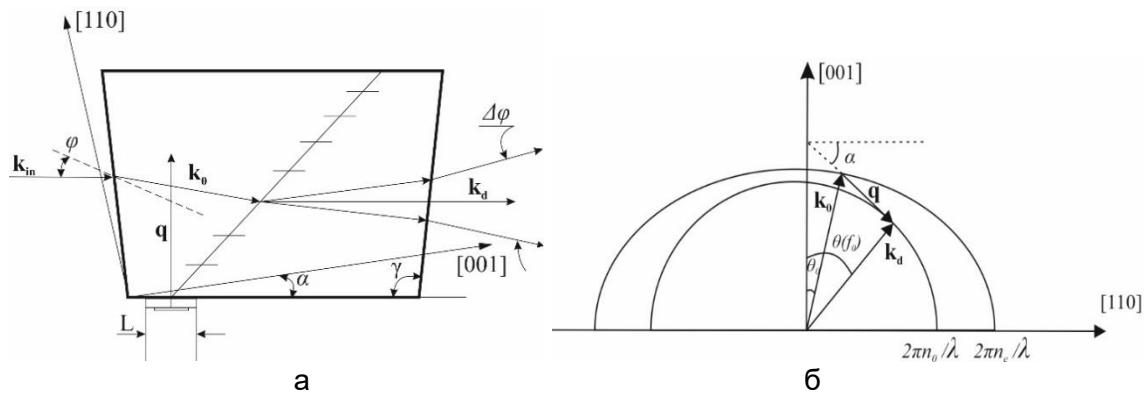


Рис. 3. Схема (а) и векторная диаграмма (б) используемых АО ячеек

Максимальные углы отклонения  $\Delta\phi_x \times \Delta\phi_y$  можно рассчитать как:

$$\Delta\phi_x = \frac{2}{\Gamma_{RS}} \arctan \left( \frac{\Delta x}{2f_{MO}} \right), \quad (1)$$

$$\Delta\phi_y = \frac{2}{\Gamma_{RS}} \arctan \left( \frac{\Delta y}{2f_{MO}} \right), \quad (2)$$

где  $\Delta x \times \Delta y$  – размеры образца;  $f_{MO}$  – фокусное расстояние микрообъектива;  $\Gamma_{RS}$  – увеличение релейной системы.

Угловое разрешение АОД ограничено дифракцией и не может превышать  $1,22(\lambda/D)$ . Число положений  $N_x \times N_y$ , разрешенных дефлектором, определяется отношением углового диапазона сканирования  $\Delta\phi_x \times \Delta\phi_y$  и угловым разрешением:

$$N_x = \frac{\Delta\phi_x D_0}{1,22\lambda}, \quad (3)$$

$$N_y = \frac{\Delta\phi_y D_0}{1,22\lambda}, \quad (4)$$

где  $D_0$  – диаметр лазерного луча;  $\lambda$  – длина волны лазера.

Диаметр входного зрачка АО ячейки  $D \geq D_0$  должен быть больше, чем диаметр лазерного луча  $D_0 = \Gamma_{BE} d$ ,  $\Gamma_{BE}$  – увеличение расширителя пучка;  $d$  – начальный диаметр лазерного пучка. Диапазон изменения частоты ультразвука, приложенного к АО ячейкам находится как:

$$\Delta f = \frac{V(\alpha)}{\lambda} \Delta\phi. \quad (5)$$

С помощью этих формул мы можем вычислить параметры АО ячеек. Например, это необходимо для улавливания частиц диаметром  $\delta=1$  мкм в диапазоне  $\Delta x \times \Delta y = 100 \times 100$  мкм, используя микрообъектив с  $f_{MO}=3,6$  мм, и Не-Не лазер ( $\lambda=632,8$  нм) с диаметром пучка  $d=1,2$  мм. Используя формулы, мы установили параметры нашей установки:  $\Gamma_{BE}=5$ ,  $\Gamma_{RS}=1$ ,  $D_0=6$  мм,  $\Delta\phi_x \times \Delta\phi_y \approx 1,5 \times 1,5^\circ$ ,  $N_x \times N_y \approx 250 \times 250$ ,  $\Delta f=32$  МГц. В настоящее время мы собираем установку, показанную на рис. 1 с приведенными параметрами.

**Заключение.** В данной работе обсуждается АО двумерная система отклонения для немеханического манипулирования микрообъектами с помощью оптического пинцета. Мы разработали и изготовили АО ячейки, которые могут стать основой такой сканирующей системы. Правильное задание их параметров и параметров других компонентов позволяет построить систему оптического захвата с требуемыми характеристиками.

## Литература

1. Lee M.P., Padgett M.J. Optical tweezers: A light touch // Journal of Microscopy. – 2012. – V. 248. – № 3. – P. 219–222.
2. Grover S.C. et al. Automated single-cell sorting system based on optical trapping // Journal of biomedical optics. – 2001. – V. 6. – № 1. – P. 14–23.
3. Summers M.D., Reid J.P., McGloin D. Optical guiding of aerosol droplets // Optics express. – 2006. – V. 14. – № 14. – P. 6373–6380.
4. Liu J., Li Z. Controlled mechanical motions of microparticles in optical tweezers // Micromachines. – 2018. – V. 9. – № 5. – P. 232.
5. Merenda F. et al. Miniaturized high-NA focusing-mirror multiple optical tweezers // Optics express. – 2007. – V. 15. – № 10. – P. 6075–6086.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.qd-india.com/wp-content/uploads/2016/10/Tweezer\\_Technology.pdf](http://www.qd-india.com/wp-content/uploads/2016/10/Tweezer_Technology.pdf), своб.
7. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. – М.: Сов.радио, 1978. – 112 с.

УДК 621.373.826

**СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПАССИВНЫЕ ЗАТВОРЫ НА ОСНОВЕ  
НАНОКРИСТАЛЛОВ  $\gamma$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$  ДЛЯ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ  
В ЭРБИЕВЫХ ЛАЗЕРАХ**

**Полищук А.В.<sup>1</sup>, Дымшиц О.С.<sup>2</sup>, Лойко П.А.<sup>1</sup>, Виткин В.В.<sup>1</sup>, Жилин А.А.<sup>2</sup>**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Виткин В.В.<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»**

Прозрачная стеклокерамика, содержащая наноразмерные кристаллы  $\gamma$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$  используется в качестве насыщающегося поглотителя для пассивной модуляции добротности в лазерах на  $\text{Er},\text{Yb}$  стекле и кристалле  $\text{Er}:YAG$ , излучающих в диапазоне длин волн 1,5–1,6 мкм. Полоса поглощения, связанная с переходом  ${}^4\text{A}_{2g}({}^4\text{F}) \rightarrow {}^4\text{T}_{1g}({}^4\text{F})$  ионов  $\text{Co}^{2+}$  в тетраэдрических координациях, для исследуемой стеклокерамики смещена в инфракрасную область до ~1,8 мкм. В  $\text{Er}:YAG$  лазере максимальная энергия импульса составила 5,9 мкДж при длительности импульса 3,0 мкс и частоте повторения 31 кГц на длине волны 1,617 мкм. В  $\text{Er},\text{Yb}$  лазере на стекле были получены импульсы с энергией 1,75 мДж, длительностью 25 нс при частоте повторения 1 Гц на длине волны 1,535 мкм.

**Ключевые слова:** стеклокерамика,  $\text{Er}:YAG$ ,  $\text{Er},\text{Yb}:glass$  лазер, пассивная модуляция добротности, твердотельные лазеры.

**Введение.** В настоящее время востребованы эрбиеевые лазеры, излучающие в условной безопасной для глаз спектральной области 1,5–1,7 мкм, для применения в таких областях, как дальномерия, дистанционное зондирование, когерентная визуализация и оптическая связь, хирургия. Эти приложения требуют коротких и мощных лазерных импульсов, которые могут достигаться в режиме модуляции добротности. Для получения импульсов 1,5–1,6 мкм твердотельные лазеры с пассивной модуляцией добротности (ПМД) демонстрируют преимущества в компактности, простоте, надежности и низкой стоимости.

В 1995 году Штульц и др. продемонстрировали ПМД в  $\text{Er},\text{Yb}$  лазере на стекле с энергией импульса 4 мДж и длительностью импульса 20 нс с использованием  $\text{Co}:YSGG$  в качестве насыщающегося поглотителя (НП) [1]. В 2005 году Штульц и др. [2] сообщили о ПМД в 1,617 мкм  $\text{Er}:YAG$ -лазере. Лазер излучал импульсы с энергией 225 мкДж и длительностью 6,8 нс при частоте повторения 3,8 кГц, используя  $\text{Cr}:ZnSe$  в качестве НП.

В 1999 году Подлипенский и др. изучали пассивную модуляцию добротности  $\text{Er},\text{Yb}$  лазера на стекле с различными НП, такие как кристаллы  $\text{Cr}:ZnSe$  и  $\text{Co}:ZnSe$  [3]. Полученная энергия лазерного импульса составила 5 мДж, а измеренная длительность импульса – 50 нс. В 2013 году Зху и др. продемонстрировали ПМД на графене в  $\text{Er}:YAG$ -лазере при длине волны 1,645 мкм. При максимальной средней выходной мощности 528 мВт была получена энергия импульса 7,08 мкДж при частоте повторения импульсов (PRF) 74,6 кГц [4].

По сравнению с монокристаллами, прозрачная стеклокерамика (СК) обладает высокой теплопроводностью и твердостью, высокой концентрацией легирования ионами переходных металлов, из таких материалов возможно изготовление оптических деталей высокого оптического качества больших размеров. В 2001 году Маляревич и др. представили прозрачную СК на основе  $\text{Co}:MgAl_2O_4$  в качестве пассивного затвора для 1,54 мкм  $\text{Er}:Yb$  лазера на стекле с ламповой накачкой [5]. Получены импульсы с энергией 5,5 мДж и длительностью 80 нс. Однако о 1,6 мкм  $\text{Er}:YAG$  лазере с ПМД и с СК в качестве НП ранее не сообщалось. Мы демонстрируем в данной работе ПМД в  $\text{Er}:YAG$ -лазере с резонансной накачкой на 1,6 мкм, а также ПМД в  $\text{Er},\text{Yb}$  лазере на стекле с использованием стеклокерамики  $\gamma$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$  в качестве пассивного затвора.

**Синтез и оптические свойства стеклокерамики  $\gamma$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$ .** Стекло состава  $13\text{Li}_2\text{O}-23\text{Ga}_2\text{O}_3-64\text{SiO}_2$  (мол.-%), легированное 0,1 мол.%  $\text{CoO}$ , плавилось в лабораторной электропечи в тигле из кварцевой керамики при  $1580^\circ\text{C}$  в течение 4 ч с постоянным перемешиванием, затем выливалось на металлическую пластину с последующим отжигом при  $640^\circ\text{C}$ . Для приготовления прозрачных СК, стекло подвергалось термообработке при температуре от  $680$  до  $770^\circ\text{C}$  в течение 6 ч. Начальное стекло было прозрачным и фиолетового цвета. После термообработки при  $680^\circ\text{C}$  и выше цвет образцов изменился на синий. Рентгенограммы (XRD) исходного стекла и СК показаны на рис. 1, а.

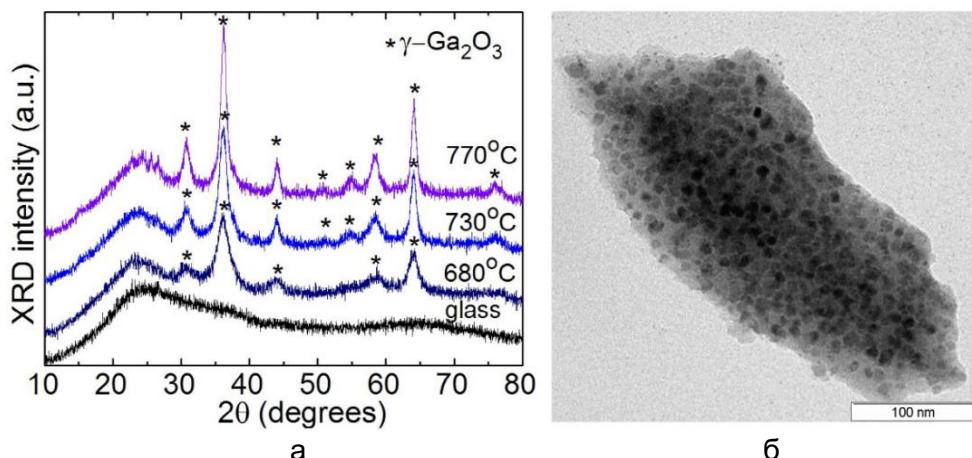


Рис. 1. Порошковые рентгенограммы исходного стекла и СК, полученные термической обработкой при  $680-770^\circ\text{C}$  (а); TEM-изображение СК, термообработанной при  $730^\circ\text{C}$  (б)

Исходное стекло было рентгеноаморфным. В стеклах, подвергнутых термообработке при  $680-770^\circ\text{C}$ , наблюдались только дифракционные пики, относящиеся к кубическим кристаллам оксида галлия  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , размер кристаллов которых по формуле Шеррера составлял от  $\sim 5$  до  $7$  нм. Осаждение наноразмерных кристаллов околосферической формы, равномерно распределенных в аморфной остаточной стеклообразной фазе, было обнаружено с помощью просвечивающей электронной микроскопии (TEM), как показано на рис. 1, б для СК, подвергнутой термообработке при  $730^\circ\text{C}$ . Средний размер неоднородных областей на TEM-изображении составлял  $\sim 7$  нм, что аналогично результатам XRD.

Спектры поглощения исходного стекла и СК представлены на рис. 2. Спектр исходного стекла типичен для поглощения ионов  $\text{Co}^{2+}$  в силикатных стеклах в узлах как октаэдрической ( $\text{Oh}$ ), так и тетраэдрической ( $\text{Td}$ ) симметрии с преобладанием  $\text{Oh}$ .

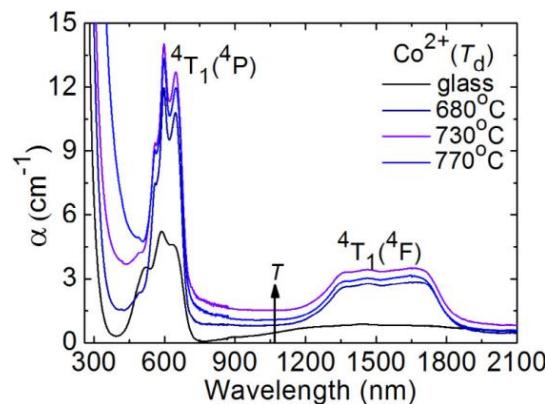


Рис. 2. Спектры поглощения исходного стекла и прозрачных СК с нанокристаллами  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$ , полученных термообработкой при  $680-770^\circ\text{C}$

Спектр заметно изменился при термообработке. Край поглощения сместился в сторону более длинных волн из-за поглощения и рассеяния света, вызванного кристаллизацией  $\gamma$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . В видимом диапазоне интенсивность пиков увеличилась, полоса поглощения при  $\sim 0,518$  мкм в исходном стекле исчезла, и возник дополнительный пик при 559 нм. Полоса в инфракрасной области увеличивалась по интенсивности и приобретала форму, характерную для поглощения тетраэдрически координированных ионов  $\text{Co}^{2+}$ . Все эти спектральные вариации при термообработке проявляют попадание ионов  $\text{Co}^{2+}$  в Td-центры в нанокристаллах  $\gamma$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ .

Интенсивная и структурированная полоса с локальными пиками при 0,559, 0,597 и 0,648 мкм и слабым плечом при 0,489 мкм была обусловлена разрешенным по спину переходом  ${}^4\text{A}_2({}^4\text{F}) \rightarrow {}^4\text{T}_1({}^4\text{P})$  и частично запрещенными по спину  ${}^4\text{A}_2({}^4\text{F}) \rightarrow {}^2\text{T}_1$  и  ${}^2\text{E}({}^2\text{P})$  ионов  $\text{Co}^{2+}$ . Широкая полоса поглощения, составляющая от  $\sim 1,3$  до 1,7 мкм, была обусловлена разрешенным по спину переходом  ${}^4\text{A}_2({}^4\text{F}) \rightarrow {}^4\text{T}_1({}^4\text{F})$  и обычно используется для пассивной модуляции добротности Er-лазеров. Поступление ионов  $\text{Co}^{2+}$  в нанокристаллы  $\gamma$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  в Td-узлах обеспечивало длинноволновый сдвиг этой полосы поглощения и облегчало использование СК на основе  $\gamma$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$ , особенно в Er:YAG-лазерах. Прозрачная СК, полученная термообработкой при  $730^\circ\text{C}$  в течение 6 ч и содержащий одну фазу  $\gamma$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$ , была выбрана для лазерных экспериментов. Интенсивность насыщения этой СК F<sub>s</sub> составляет 0,8 Дж/см<sup>2</sup> (при измерении при 1,54 мкм для импульсов с длительностью 25 ns).

**Модуляция добротности в Yb:Er-лазере на стекле.** Исследуемая стеклокерамика была протестирована для ПМД в Yb:Er-лазере на стекле с диодной накачкой. Оптическая схема Yb:Er лазера на стекле представлена на рис. 3.

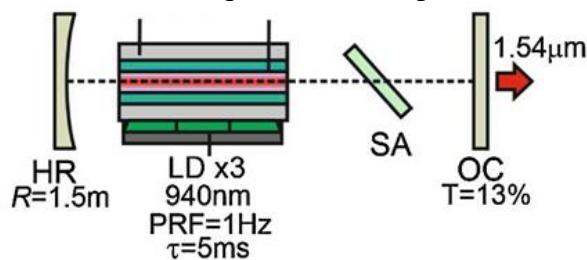


Рис. 3. Оптическая схема 1,54 мкм Yb:Er-лазера на стекле

Активный элемент с диаметром 1,6 мм и длиной 24 мм был получен из коммерческого фосфатного стекла легированного Er и Yb с концентрациями ионов  $0,27 \times 10^{20}$  и  $2,5 \times 10^{21}$  см<sup>-3</sup>, соответственно. Боковая диодная накачка осуществлялась с помощью трех полупроводниковых лазерных диодов мощностью 70 Вт каждая, работающих на длине волны 940 нм. Длительность импульса накачки составляла 5 мс с частотой повторения импульсов (PRF) 1 Гц. Общая длина резонатора составляла 65 мм. Глухое зеркало резонатора было вогнутым с радиусом кривизны 1,5 м и обладало высокой отражательной способностью (HR) на длине волны лазера 1,54 мкм. Плоское выходное зеркало имело пропускание  $T_{OC}=13\%$ . НП был расположен между активным элементом и выходным зеркалом под нормальным углом. Радиус лазерной моды на НП составил  $\sim 150$  мкм.

В режиме свободной генерации энергия импульса составила 41 мДж, при энергии импульса накачки  $E_{in}=690$  мДж. Дифференциальный КПД составил 7%. В режиме модуляции добротности была получена энергия импульса 1,75 мДж при энергии накачки  $E_{in}=300$  мДж. Эффективность преобразования в моноимпульс по отношению к режиму свободной генерации составила 10%. Осциллограмма длительности импульса в режиме модуляции добротности показана на рис. 4, а. Длительность импульса составила 25,4 нс.

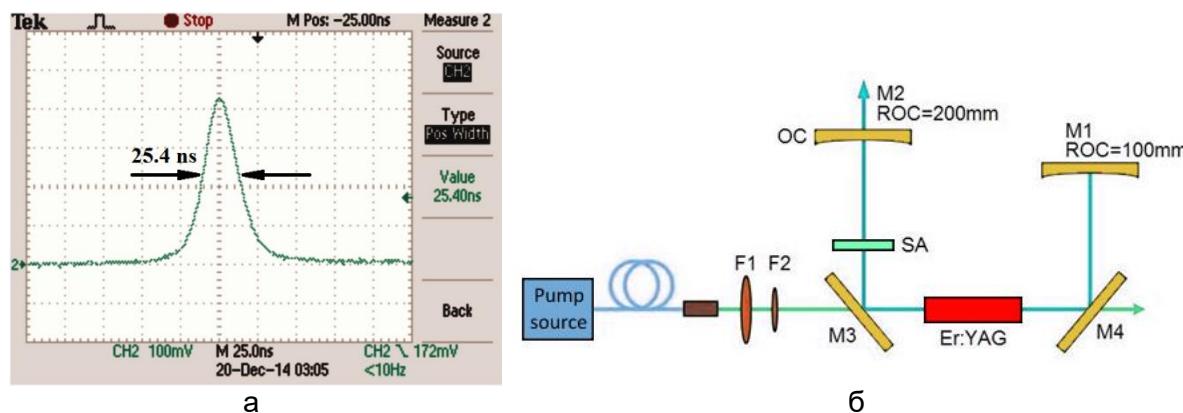


Рис. 4. Осциллограмма импульса в режиме ПМД в Yb:Er лазере на стекле (а); оптическая схема 1,6 мкм Er:YAG лазера с резонансной накачкой, работающего в режиме ПМД (б)

**Модуляция добротности в лазере на кристалле Er:YAG.** Экспериментальная установка Er:YAG лазера показана на рис. 4, б.

У-образный резонатор был спроектирован так, чтобы избежать обратного отражения излучения накачки от волоконного лазера. Такая конструкция резонатора также предотвращала повреждение НП непоглощенной накачкой, наблюдаемой для линейного двухзеркального резонатора. Общая геометрическая длина резонатора составляла 285 мм. Конечное зеркало (M1) представляло собой вогнутое зеркало с радиусом кривизны (*ROC*) 100 мм и высокоотражающим покрытием при 1,6 мкм. Выходное зеркало M2 имело *ROC*=200 мм и коэффициент пропускания 22% при 1,6 мкм. M3 и M4 были дихроичными зеркалами, покрытыми для высокой пропускной способности (НТ) при 1,532 мкм и высокой отражательной способности при 1,6 мкм.

В качестве усиливающей среды лазера использовался активный элемент Er:YAG диаметром 4 мм и длиной 40 мм. Обе грани кристалла были отполированы до лазерного качества и покрыты для НТ при 1,5 мкм ( $T>95\%$ ) и при 1,6 мкм ( $T>99,9\%$ ). Кристалл с индивидуальной подложкой был установлен в медном радиаторе для поддержания температуры на уровне 18 °C с помощью термоэлектрического модуля. Источником накачки служил волоконный лазер 1,532 мкм (IPG Photonics, ELR-20) с шириной полосы излучения 0,2 нм. Пучок накачки фокусировался в кристалл Er:YAG с помощью системы линз *F*1 и *F*2, которые имели антиотражающее покрытие на длину волны 1,532 мкм. Фокусное расстояние этих двух линз составляло 400 и 75 мм соответственно. НП был вставлен в полость рядом с зеркалом M3 с нормальным падением для обеспечения работы в режиме ПМД. НП, изготовленный из СК, представлял собой полированную плиту без покрытия толщиной 470 мкм, установленную на медную пластину. Радиус лазерной моды на НП, рассчитанный по методу ABCD, составлял ~270 мкм. Импульсный выход лазера контролировался высокоскоростным фотодиодом InGaAs вместе с цифровым осциллографом (Tektronix, TDS5052B, 500 МГц).

Для лазера, работающего в режиме непрерывной волны без НП в резонаторе было получено выходное излучение с мощностью до 7,02 Вт при длине волны 1,645 мкм и мощности накачки *P*<sub>inc</sub> 20,6 Вт для выходного зеркала с наиболее оптимальным коэффициентом пропускания *T*<sub>OC</sub>=22%. Когда НП был вставлен в резонатор, была достигнута стабильная ПМД. На рис. 5 показан выходной импульс лазера Er:YAG в режиме ПМД при максимальном значении *P*<sub>inc</sub>, равном 20,6 Вт.

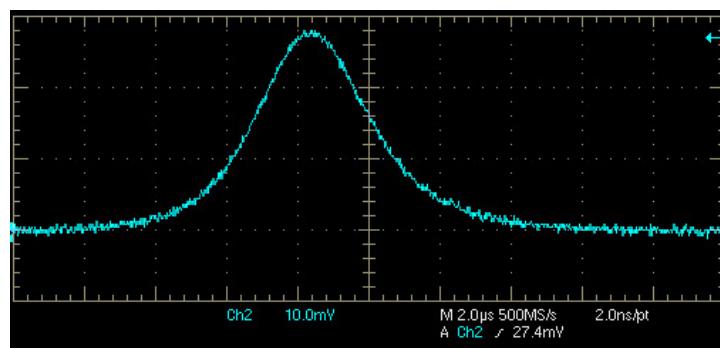


Рис. 5. Моноимпульс Er:YAG лазера в режиме ПМД

Спектры излучения импульсного Er:YAG-лазера измерялись спектрометром (Ocean Optics, NIRQuest-512). Длина волны излучения Er:YAG-лазера составляла 1,617 мкм. Ионы  $\text{Er}^{3+}$  в кристалле YAG имеют более высокое сечение стимулированного излучения при 1,617 мкм, чем при 1,645 мкм. Однако первая длина волны соответствует также более сильной реабсорбции. Таким образом, только для высоких коэффициентов инверсии  $\beta > 0,35$ , что означает, что более 35% ионов  $\text{Er}^{3+}$  возбуждаются на верхнем лазерном уровне ( $^4I_{13/2}$ ), лазер Er:YAG мог работать при 1,617 мкм при комнатной температуре, и конкуренция по длине волны не наблюдалась из-за высоких потерь на выход. Средняя выходная мощность и зависимость частоты от  $P_{\text{inc}}$  показаны на рис. 6, а.

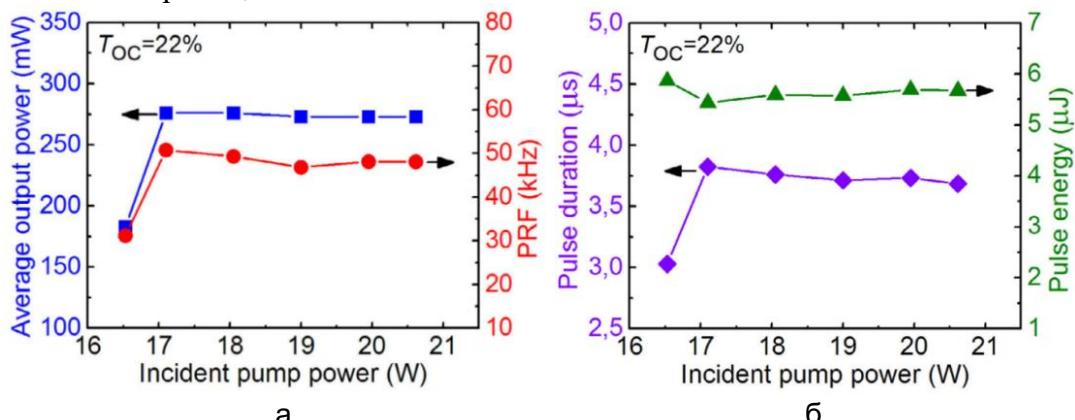


Рис. 6. Средняя выходная мощность и частота повторения импульсов в зависимости от падающей мощности накачки для  $T_{\text{OC}}=22\%$  (а); зависимость длительности импульса и энергии импульса от  $P_{\text{inc}}$  (б)

Максимальная средняя выходная мощность достигла 273 мВт при  $P_{\text{inc}}=20,6$  Вт. Соотношение между средней выходной мощностью и мощностью падающей накачки не было линейным. Это объясняется тепловой нагрузкой при использовании ОС с высоким коэффициентом пропускания, из-за большей заселенности верхнего уровня лазера (более высокий коэффициент инверсии  $\beta$ ). На рис. 6, б показана длительность импульса (определенная как полная ширина на половине максимума, FWHM) и энергия импульса как функция  $P_{\text{inc}}$ .

Длительность импульса и энергия оставались практически неизменными для  $P_{\text{inc}} > 17$  Вт. Наибольшая энергия импульса составила 5,9 мкДж при длительности импульса 3,0 мкс и частоте повторения импульсов 31 кГц при  $P_{\text{inc}}=16,5$  Вт. При работе лазера в режиме ПМД повреждения НП не наблюдалось. Этому способствует высокий порог лазерно-индукционного повреждения (LIDT) СК, равный  $\sim 20 \pm 2$  Дж/см<sup>2</sup>. Для достижения наибольшего просветления требуется более плотная фокусировка лазерной моды на НП, что приведет к дальнейшему масштабированию энергии импульса и сокращению его длительности.

**Заключение.** В заключении мы сообщаем о применении прозрачной СК на основе нанокристаллов  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$  в качестве НП для ПМД в Er:YAG лазере с резонансной накачкой, работающего при 1,617 и 1,645 мкм. Наилучшие импульсные характеристики, полученные с помощью этого лазера, составляют 5,9 мкДж/3,0 мкс при частоте повторения импульсов (PRF) 31 кГц, а максимальная средняя выходная мощность составляет 273 мВт. На основе разработанной СК реализована ПМД в Er,Yb лазере на стекле с диодной накачкой, с энергией импульса 1,75 мДж и длительностью 25 нс на длине волны 1,54 мкм. Эти результаты показывают пригодность СК на основе нанокристаллов  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$  для пассивной модуляции добротности в кристаллических Er-лазерах, излучающих на длине волны 1,6 мкм. Применимость СК на основе  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$  в кристаллических Er-лазерах для ПМД связана с длинноволновым сдвигом перехода  ${}^4\text{A}_{2g}({}^4\text{F}) \rightarrow {}^4\text{T}_{1g}({}^4\text{F})$  ионов  $\text{Co}^{2+}$  в Td-узлах в нанокристаллах  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ . Этот эффект обусловлен более слабым лигандным полем для ионов  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$ , вызванным большими радиусами ионов  $\text{Ga}^{3+}$  по сравнению с ионами  $\text{Al}^{3+}$  (например, для кристалла  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ). Дальнейшее увеличение мощности лазера возможно при увеличении глубины модуляции НП и оптимизации концентрации легирования CoO, приводящей к низким ненасыщенным потерям.

### Литература

1. Camargo M.B. et al. Co 2+: YSGG saturable absorber Q switch for infrared erbium lasers // Optics letters. – 1995. – V. 20. – № 3. – P. 339–341.
2. Stultz R.D., Leyva V., Spariosu K. Short pulse, high-repetition rate, passively Q-switched Er: yttrium-aluminum-garnet laser at 1.6 microns // Applied Physics Letters. – 2005. – V. 87. – № 24. – P. 241118.
3. Podlipensky A.V. et al. Cr 2+: ZnSe and Co 2+: ZnSe saturable-absorber Q switches for 1.54- $\mu\text{m}$  Er: glass lasers // Optics letters. – 1999. – V. 24. – № 14. – P. 960–962.
4. Zhu Z.X. et al. A graphene-based passively Q-switched polycrystalline Er: YAG ceramic laser operating at 1645 nm // Laser Physics Letters. – 2013. – V. 10. – № 5. – P. 055801.
5. Malyarevich A.M. et al. Cobalt-doped transparent glass ceramic as a saturable absorber Q switch for erbium: glass lasers // Applied optics. – 2001. – V. 40. – № 24. – P. 4322–4325.

УДК 544

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОГРЕВА И СОСТАВА ПДМС НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО РЕОЛОГИЧЕСКИХ И АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ**

Прасолов Н.Д.<sup>1</sup>, Панов Д.Ю.<sup>1</sup>, Соснин И.М.<sup>1</sup>, Акимов В.И.<sup>2</sup>, Агенков Е.Г.<sup>2</sup>,  
Власов С.Ю.<sup>1,3</sup>, Дорогин Л.М.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Брунков П.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>Тольяттинский государственный университет; <sup>3</sup>Тартуский университет

Полидиметилсилоксан (ПДМС) – это кремнийорганический полимер, входящий в группу силиконов. Он является наиболее широко используемым полимером на основе кремния и особенно известен своими необычными реологическими свойствами. Он имеет широкий диапазон применения как в медицине, и косметологии так и в производстве. В данной работе представлены результаты проведения реологических испытаний образцов силикона и экспериментов по измерению адгезии ПДМС при различных концентрациях базовой жидкости и связывающего агента и при различных условиях затвердевания.

**Ключевые слова:** контакт и адгезия, полидиметилсилоксан, реология, трибология.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 418230 «Сравнительный анализ на пределы применимости метода молекулярной динамики функции Грина».

**Введение.** Взаимодействие между твердым шаром и плоской упругой подложкой часто описывается с помощью модели Джонсона-Кендалла-Робертса (JKR) [1]. Когда подложка представляет собой упругое тело, полная энергия состоит из энергии упругой деформации и энергии межфазного взаимодействия между атомами на контактирующей границе. В качестве подложки мы используем полидиметилсилоксан (ПДМС), в котором молекулы медленно связываются в ходе химической реакции, пока материал не затвердеет [2–6]. ПДМС часто используются для модельных исследований адгезии и трения. Вариация состава ПДМС и условий его твердения позволяет изменять плотность поперечных связей полимера [7], что влияет на адгезионные свойства твердого полимера и скорость изменения вязкости в процесс твердения. В данной работе представлены результаты исследований влияния нагрева и СВЧ-излучения на изменение вязкости и адгезии ПДМС в ходе твердения.

**Материалы и методы.** Из коммерческого двухкомпонентного набора Sylgard 184 (производство Dow Corning, США), состоящего из базовой жидкости (ПДМС с виниловыми окончаниями) и связывающего агента (метилгидроксилоксан-диметилсилоксан кополимер) с подходящим катализатором. Из этих двух компонентов мы приготовили набор смесей в массовом отношении 10:1 (базовая жидкость/связывающий агент). Компоненты были перемешаны в миксере (SpeedMixer DAC 150.1 FVZ, Hauschild Eng., Германия) в течение 5 мин, и далее смесь была дегазирована для удаления пузырьков воздуха, вызванных перемешиванием, затем вылита в чашу Петри. Было изготовлено 12 образцов с различным соотношением базовая жидкость/связывающий реагент. 6 образцов медленно затвердевали при комнатной температуре в течение суток, другие 6 были подвергнуты СВЧ-излучению для ускорения их затвердевания. Следует отметить, что перед взаимодействием со сферическим адгезионным зондом (стеклянным шаром) поверхности всех остальных образцов ПДМС очень гладкие из-за действия силы тяжести.

Мы изучили адгезионное взаимодействие между стеклянным шаром и образцом ПДМС с помощью той же установки, что использовалась в работе [7]. Схема установки представлена на рис. 1. В ходе экспериментов мы приводим шар диаметром  $2R=2,5$  см в

контакт с подложкой эластомера. Подложка расположена на аналитических весах высокой точности (производство AND, модель GH-252) с воспроизводимостью измерений в 0,1 мг (или  $\approx 1$  мН), которые служат в качестве датчика силы.

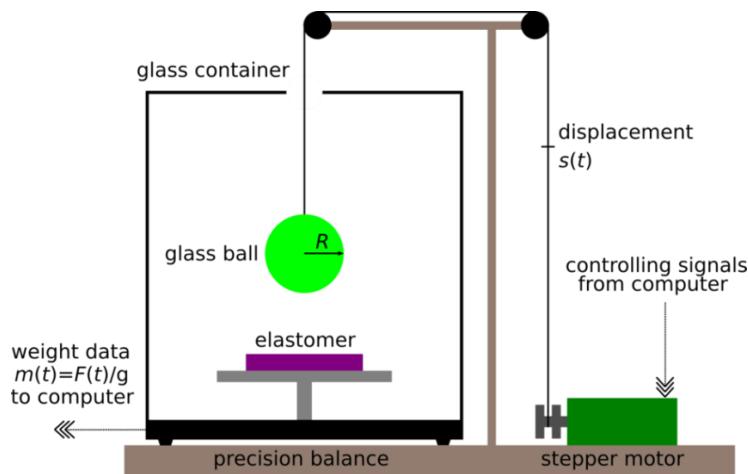


Рис. 1. Схема эксперимента по методу JKR с плоским резиновым образцом, контактирующим со стеклянным шаром, приводимым в движение точным электродвигателем на чувствительных весах, позволяющих измерять силу взаимодействия

Чтобы перемещать стеклянный шар, мы использовали электрический шаговой двигатель, наматывающий нейлоновую леску, которая прикреплена к стеклянному шару. Скорость вытягивания как функция времени может быть задана на компьютере. В экспериментах, представленных ниже, стеклянный шар многократно перемещается вверх и вниз. В каждом цикле контакта сила нагрузки (когда ПДМС находится в твердом состоянии) составляет около 0,1 Н, а вертикальная скорость  $v_z \approx 6$  мкм/с.

Реологические испытания образцов силикона, подвергающегося связыванию, осуществлялись при помощи ротационного вискозиметра Brookfield DV2T. Принцип работы вискозиметра основан на измерении закручивания калибровочной пружины при вращении шпинделя в тестируемой жидкостью с определенной скоростью. Для проведения измерений был выбран шпиндель LV-04(64), позволяющий определять вязкость жидкости от 1 до 6000000 сСт. Температура связывающегося полимера поддерживалась при помощи термостата Termex BT8-2. Измерения проводились каждые 30 мин в автоматическом режиме с использованием программного обеспечения PG Flash в течение всего процесса твердения до предела обнаружения прибора. Для выявления особенностей процесса связывания менялся состав образцов, в том числе характеристики и концентрация нанообъектов и температура связывания.

**Результаты.** Изменение, вязкости и силы адгезии от времени для полного процесса отвердения силикона описано в работе [8]. На протяжении первых 15–16 ч с момента смешивания ПДМС находится в жидком состоянии. В течение этого времени отталкивающего взаимодействия между шаром и ПДМС нет, но формируется капиллярный мост притяжения между ними, как только стеклянный шар прикасается к поверхности жидкого ПДМС. Далее материал становится очень близок к точке геля, в которой происходит переколяция молекулярной сети, образованной связанными олигомерами ПДМС.

Вязкость силикона в процессе связывания повышается на три порядка. На рис. 2, а представлены графики зависимости десятичного логарифма кинематической вязкости силиконового полимера от времени. Из графика видно, что температура оказывает существенное влияние на процесс связывания. Твердение при 100°C длится около

10 мин, при  $150^{\circ}$  – около 5 мин. Связывающий агент имеет меньшую вязкость, поэтому при добавлении его в силикон он способствует вначале снижению вязкости полученного раствора, а затем росту вязкости. Связывание проводилось также при комнатной температуре ( $20$ – $25^{\circ}\text{C}$ ), данные представлены на рис. 2, б. Было обнаружено, что незначительные колебания температуры заметно сказываются на скорости набора вязкости, переход в твердое состояние при этом наступает с разницей от 350 до 450 мин. Дальнейшие исследования твердения проводились с использованием термостата Termex BT8-2 при температуре  $30^{\circ}\text{C}$ .

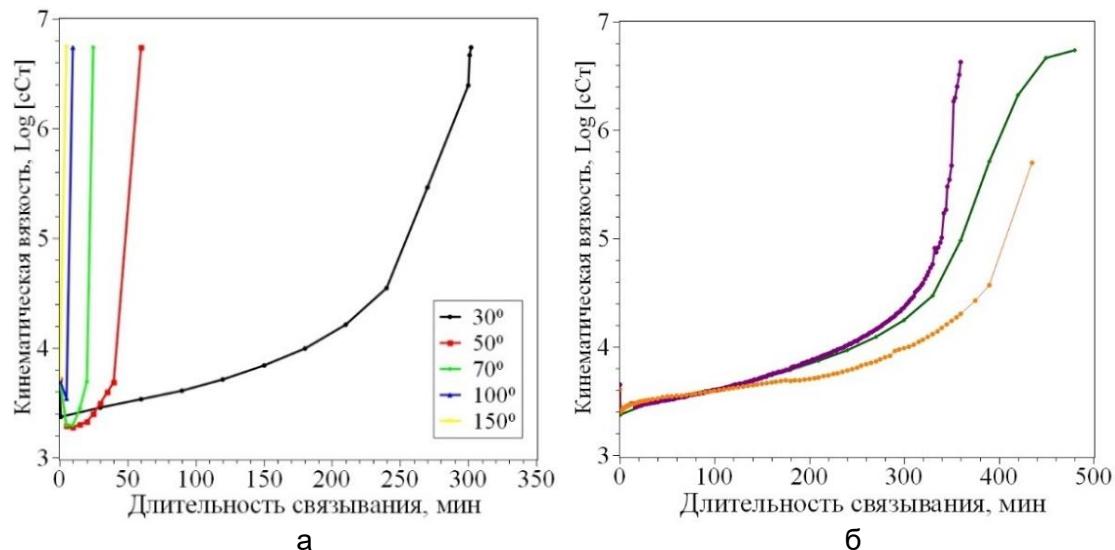


Рис. 2. Влияние температуры прогрева стандартного состава PDMS Sylgard 184 при соотношении базовой жидкости к связывающему агенту 10:1

СВЧ-излучение значительно повышает температуру ПДМС, что приводит к высокой скорости связывания ( $\sim 2$  мин). При этом, для данных образцов наблюдается изменение силы адгезии в сторону ее уменьшения для образцов с соотношением базовой жидкости к связывающему агенту от 1:1 до 50:1, по сравнению с силиконом, затвердевавшим при комнатной температуре (рис. 3).

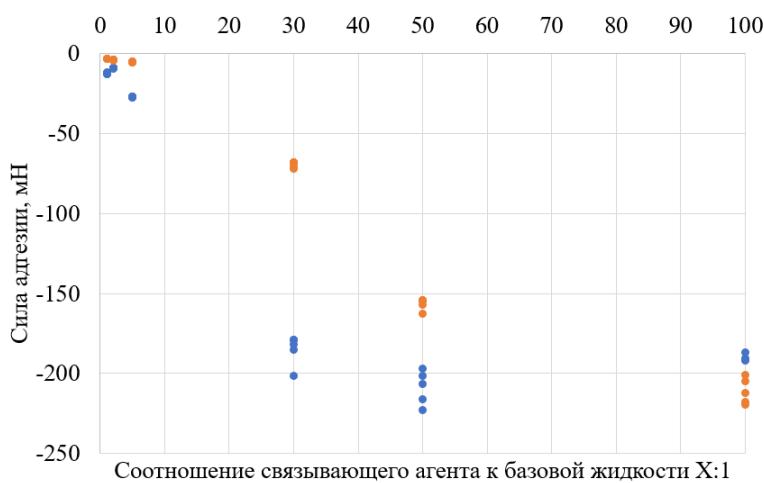


Рис. 3. Влияние СВЧ-излучения на силу адгезии в зависимости от соотношения базовой жидкости к связывающему агенту от 1:1 до 100:1

**Заключение.** В работе были проведены исследования влияния температуры прогрева и состава ПДМС на изменение его реологических и адгезионных свойств. Для образцов с различной концентрацией базовой жидкости к связывающему агенту показано, что повышение температуры значительно влияет как на скорость связывания

ПДМС (с соотношением базовая жидкость/связывающий агент 10:1), ускоряя ее в 6 раз при повышении температуры на 25°C. Воздействие СВЧ-излучения нагревает ПДМС, ускоряя его связывание и меняет его адгезионные свойства, уменьшая силу адгезии для составов с соотношением базовой жидкости к связывающему агенту от 1:1 до 50:1.

### Литература

1. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface energy and the contact of elastic solids // Proceedings of the royal society of London. A. mathematical and physical sciences. – 1971. – V. 324. – № 1558. – P. 301–313.
2. Ghannam M.T., Esmail M.N. Rheological properties of poly (dimethylsiloxane) // Industrial & engineering chemistry research. – 1998. – V. 37. – № 4. – P. 1335–1340.
3. Zhu Y. et al. Rheological properties of PDMS/clay nanocomposites and their sensitivity to microstructure // Rheologica acta. – 2009. – V. 48. – № 9. – P. 1049.
4. Zhou Y. et al. Rheological properties of PDMS filled with CaCO<sub>3</sub>: the effect of filler particle size and concentration // Journal of applied polymer science. – 2006. – V. 101. – № 5. – P. 3395–3401.
5. Van Meer B.J. et al. Small molecule absorption by PDMS in the context of drug response bioassays // Biochemical and biophysical research communications. – 2017. – V. 482. – № 2. – P. 323–328.
6. Hiltunen J. et al. Roll-to-roll fabrication of integrated PDMS–paper microfluidics for nucleic acid amplification // Lab on a Chip. – 2018. – V. 18. – № 11. – P. 1552–1559.
7. Tiwari A. et al. The effect of surface roughness and viscoelasticity on rubber adhesion // Soft Matter. – 2017. – V. 13. – № 19. – P. 3602–3621.
8. Dorogin L.M. et al. Adhesion of polydimethylsiloxane during molecular cross-linking // Letters on Materials. – 2019. – V. 9. – № 1. – P. 58–63.

УДК 544

**ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
НА ОСНОВЕ ZnO И ПДМС****Прасолов Н.Д.<sup>1</sup>, Панов Д.Ю.<sup>1</sup>, Соснин И.М.<sup>1</sup>, Агенков В.И.<sup>2</sup>, Акимов Е.Г.<sup>2</sup>,  
Власов С.В.<sup>1,3</sup>, Дорогин Л.М.<sup>1</sup>****Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Брунков П.Н.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>Тольяттинский государственный университет;<sup>3</sup>Тартуский университет

В работе рассматривается метод получения фотокаталитически активных композиционных материалов на основе полимерной матрицы из полидиметилсилоксана (ПДМС) и частиц ZnO. Синтез полимерной матрицы осуществлялся путем смешивания базовой жидкости и связывающего агента в разных соотношениях. В качестве сырья для получения ПДМС использовался Sylgard 184 производства Dow Chemical. Образцы ПДМС механически перемешивались, затем прогревались в сушильном шкафу до формирования твердого образа. Далее порошок ZnO наносился на полученные образцы тонким слоем, незакрепленные частицы смывались дистиллированной водой при ультразвуковой обработке. Полученные композиционные материалы были помещены в воду, содержащую фенол, и облучались ультрафиолетовой лампой. Концентрация фенола исследовалась каждый час. Образцы исследовались на разные сроки хранения после связывания ПДМС. Установлено, что глубина связывания ПДМС существенно влияет на фотокаталитические свойства композиционного материала. Полученные результаты имеют перспективы использования в технологиях очистки сточных вод от токсичных органических соединений.

**Ключевые слова:** ПДМС, силикон, модификация поверхности, фотокаталитический ZnO, окисление фенола.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 418230 «Сравнительный анализ на пределы применимости метода молекулярной динамики функции Грина».

**Введение.** Силиконы – полимерные материалы на основе высокомолекулярных кислородосодержащих кремнеорганических соединений. Силиконы широко используются в быту и промышленности. В частности, силиконы находят применение в строительной отрасли, в электронике, в создании аналитического химического оборудования, в медицине и тд. Одним из наиболее широко используемых силиконов являются материалы на основе полидиметилсилоксана (ПДМС) ввиду простоты получения, модификации свойств и получения функциональных материалов на его основе.

Ввиду своей инертности по отношению к воде силиконы могут быть использованы для создания материалов, предназначенных для очистки сточных вод от токсичных органических соединений. Модификация поверхности позволяет создавать сорбционные материалы на основе ПДМС, а также фотокаталитически активные [1, 2]. Фотокаталитически активные частицы, закрепленные на подложке из ПДМС могут быть легко удалены из воды после окисления органических загрязнений без использования тонких керамических мембран. Известно, что активность фотокаталитизаторов возрастает с уменьшением размеров его частиц [3–5]. Отделение частиц размером 20–30 нм от воды при помощи мембран в существенной степени снижает производительность процесса очистки. Использование композитов на основе ПДМС позволяет решить эту проблему. При этом важным фактором активности композита является свойства ПДМС, входящего в его состав. В данной работе представлены данные о влиянии состава ПДМС и длительности твердения на фотокаталитическую активности композиционного материала.

**Материалы и методы.** В работе использовался ПДМС производства Dow Chemical марки Sylgard 184, поставляемого в виде двухкомпонентной жидкости (базы и связывающего агента). Для исследований было получено три образца с массовым соотношением базы к связывающему агенту 1:20, 1:30, 1:40. Полученные образцы были прогреты в сушильном шкафу при температуре 115°C в течение 40 мин. Оксид цинка ГОСТ 10262-73 был нанесен на одну из поверхностей полимерных образцов после затвердевания. Избыток частиц был смыт дистиллированной водой в ультразвуковой ванне. Полученные композиционные материалы использовались в качестве фотокатализаторов окисления фенола под действием ультрафиолетового облучения (Лампа с облучением 365 нм, 18 Вт). Изначальная концентрация фенола в воде составила 1 мг/л. Концентрация фенола измерялась при помощи флуориметра Shimadzu RF-6000 (Япония). Образцы были испытаны через 1 сутки и через 5 суток хранения при комнатных условиях после смешивания.

**Результаты.** Полученные образцы имеют форму диска с радиусом 2 см, толщиной 0,7 мм. Одна из сторон образцов покрыта равномерным слоем оксида цинка с одной стороны, как это показано на рис. 1. Для исследования фотокаталитической активности каждый из образцов помещался в стеклянный стакан с водой, содержащей фенол на пластмассовой подставке, расположенной под уровнем воды. Во всех случаях объем воды составил 75 мл. Все образцы облучались лампой. Под каждой подставкой былложен магнитный якорь, вращавшийся при помощи магнитной мешалки со скоростью 500 об/мин.



Рис. 1. Образец композита ПДМС-ЗnO с соотношением базы к связывающему агенту 1 к 20

Результаты фотокаталитических испытаний полученных композитов показаны на рис. 2. Из данных видно, что вне зависимости от срока хранения образцов соотношение базовой жидкости к связывающему агенту существенно влияет на фотокаталитическую активность. При этом увеличение срока хранения образцов при комнатной температуре привело к возрастанию их фотокаталитической активности.

Изменение концентрации фенола в воде в присутствии образов, хранившихся в течение 1 суток представлено на рис. 2, а. На графике видно, что для всех трех образов характерно резкое снижение концентрации фенола на спустя 30 мин после начала эксперимента, а затем резкое повышение концентрации до значений близких к изначальным. Такое изменение концентрации говорит о процессах сорбции/десорбции фенола на поверхности ПДМС. При этом величина этого снижения уменьшается в ряду (1:20)>(1:30)>(1:40). Увеличение количества связывающего агента в смеси ПДМС увеличивает колебание концентрации фенола в ходе сорбции/десорбции на начальных стадиях фотокатализа, что говорит об изменении сорбционных свойств ПДМС по

отношению к фенолу при изменении глубины связывания. Скорость фотокаталитического окисления фенола в присутствии образца 1-20 оказалась максимальной. Ароматическое кольцо в молекуле фенола обладает неполярными свойствами и хорошо сорбируется на неполярных поверхностях, в данном случае на поверхности ПДМС. Увеличение глубины связывания ПДМС привело к повышению сорбционной способности, а также фотокаталитической активности.

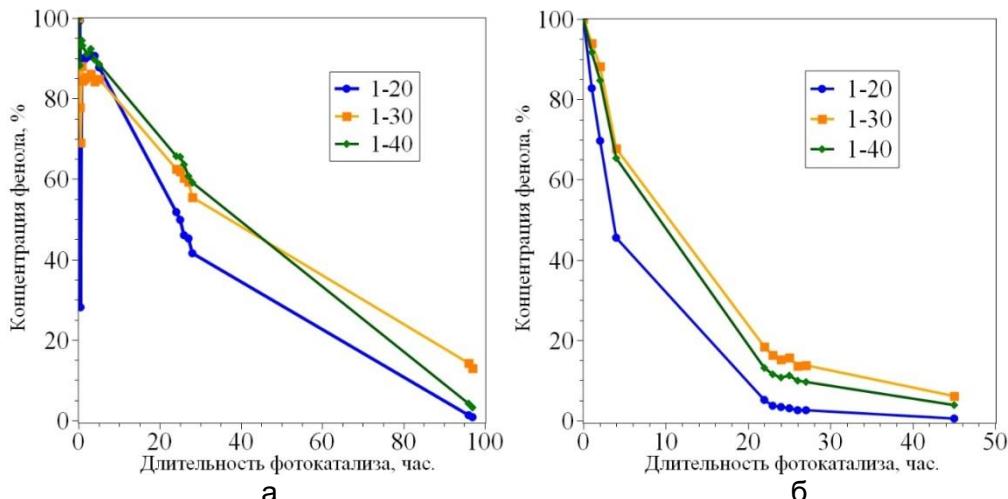


Рис. 2. Результаты испытания образцов на фотокаталитическую активность на примере окисления фенола в воде: образцы, выдержаные 1 сутки в комнатных условиях после затвердевания (а); образцы, выдержаные 5 суток в комнатных условиях после затвердевания (б)

Активность образцов во всех трех случаях увеличилась после хранения их в комнатных условиях в течение 5 суток, данные представлены на рис. 2, б. При этом состав 1-20 как и в первом случае показал максимальную активность, что также говорит о влиянии глубины связывания ПДМС на фотокаталитическую активность полученных композиционных материалов. Константа скорости окисления фенола для всех случаев была рассчитана по формуле:

$$K = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C}\right)}{t}, \quad (1)$$

где  $K$  – константа скорости;  $C_0$  – исходная концентрация фенола, моль/л;  $C$  – концентрация фенола на момент времени, моль/л;  $t$  – время фотокатализа, по истечению которого концентрация фенола принимает значения  $C$ .

Константы скорости окисления фенола всех представленных экспериментов показаны в Таблица.

Таблица. Значение констант скорости фотокаталитического окисления фенола в присутствии образцов PDMS/ZnO

	Константа скорости окисления фенола, 1/час		
Соотношение базовой жидкости к связывающему агенту	1-20	1-30	1-40
1 сутки хранения	0,050	0,057	0,041
5 суток хранения	0,152	0,102	0,089

В данной работе мы показали, что композиционные материалы на основе ПДМС/ZnO могут быть использованы для окисления фенола, растворенного в воде. Состав ПДМС и методы его обработки позволяют управлять скоростью окисления фенола. Так, при изменении соотношения базы к связывающему агенту в ПДМС с 1-20

до 1–40, константа скорости окисления фенола на пятые сутки хранения уменьшилась в 1,7 раз. Полученные материалы могут использоваться в технологиях очистки сточных вод. Закрепление фотокаталитически активных частиц на ПДМС позволяет извлекать их после окончания процессов окисления токсичных органических веществ без использования тонких керамических мембран, что позволяет увеличить производительность процесса очистки.

### Литература

1. Lamberti A. Microfluidic photocatalytic device exploiting PDMS/TiO<sub>2</sub> nanocomposite // Applied Surface Science. – 2015. – V. 335. – P. 50–54.
2. Hickman R., Walker E., Chowdhury S. TiO<sub>2</sub>-PDMS composite sponge for adsorption and solar mediated photodegradation of dye pollutants // Journal of water process engineering. – 2018. – V. 24. – P. 74–82.
3. Zhang X. et al. Effect of aspect ratio and surface defects on the photocatalytic activity of ZnO nanorods // Scientific reports. – 2014. – V. 4. – P. 4596.
4. Cernuto G. et al. Size and shape dependence of the photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> nanocrystals: a total scattering Debye function study // Journal of the American Chemical Society. – 2011. – V. 133. – № 9. – P. 3114–3119.
5. Kar A. et al. Influence of size and shape on the photocatalytic properties of SnO<sub>2</sub> nanocrystals // ChemPhysChem. – 2015. – V. 16. – № 5. – P. 1017–1025.

УДК 678.743.22

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АГРЕССИВНЫХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРУ  
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ  
ИК-СПЕКТРОСКОПИИ**

**Самуйлова Е.О.<sup>1</sup>, Лютова А.А.<sup>1</sup>, Калганова А.И.<sup>1</sup>, Ситникова В.Е.<sup>1</sup>, Кузьмин А.В.<sup>1</sup>,  
Успенская М.В.<sup>1</sup>**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Успенская М.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В ходе работы было изучено влияние агрессивных факторов, таких как воздействие бензина, кисломолочная среды на структурные характеристики полимерных композитов на основе поливинилхлорида, полигидроксибутират с различным содержанием растительного наполнителя.

**Ключевые слова:** поливинилхлорид, полигидроксибутират, ПВХ композиты, древесно-полимерные композиты, бензостойкость.

**Введение.** В современном мире с улучшением качества жизни происходит неуклонное увеличение численности населения планеты. Соответственно растет количество потребляемых продуктов различных производств, основная часть которых сейчас ориентирована на производство и поставку полимерных товаров на рынок. В связи с этим отсутствие эффективной методики утилизации полимеров является одной из главных экологических проблем нашего мира на данный момент [1]. Наиболее рациональным способом решения существующей проблемы накопления полимерных отходов является разработка широкого спектра биоразлагаемого в естественных условиях материала и его активное применение в качестве упаковочного, как альтернатива уже имеющимся материалам, производство которых оценивается в миллионы тонн в год. При этом не всегда требуется создавать что-то совершенно новое, так как возможна модификация уже используемого материала устойчивого к различным естественным средам полимера за счет добавления быстро разлагающихся компонентов (биополимеров и растительных наполнителей). В то же время обоснованным экономически способом достижения данной цели является поиск дешевых, простых и доступных методов модификации [2].

Для оценки уровня деградации полученного полимерного композита необходимо анализировать, как влияние действия микроорганизмов, так и достаточно агрессивных сред, используемых на большинстве производств. При этом степень разложения образца при контакте с указанными организмами даст наиболее дешевую и достоверную статистически информацию, так как является простой моделью результата взаимодействия образцов с другими живыми объектами [3, 4].

Одним из полимеров, на основе которого можно получать различные полимерные композиты является поливинилхлорид (ПВХ). Объемы его производства оцениваются в 40 миллионов тонн в год, что составляет приблизительно пятую часть от мирового объема производства полимеров. Его можно перерабатывать различными методами и получать на его основе различные продукты.

В связи со всем вышесказанным, в качестве объекта исследования в настоящей работе были выбраны пленки, в состав которых входили ПВХ, полигидроксибутират (ПГБ) и растительный наполнитель [5]. Полученные образцы полимерных композитов тестировались на стойкость к воздействию бензина, кисломолочной среды и устойчивость к почвенному биогеоценозу. Структурные изменения определялись методом ИК спектроскопии, а также методом оптической микроскопии.

### Материалы и методы

1. Получение полимерных пленок. Для получения пленок использовали готовую промышленную порошкообразную композицию на основе непластифицированного супензионного ПВХ, гранулированного ПГБ марки «Kaneka Aonilex X131A» и растительных наполнителей: еловой муки, древесной муки без лигнина марки «Arbocel» и рисовой шелухи. Пленки получали метод вальцевания расплава смеси компонентов на цилиндрических вальцах диаметром 150 мм при скорости вальцов 24 оборота в минуту и температуре 175°C. Составы полученных пленок отвечают следующим соотношениям: ПВХ/ПГБ/растительный наполнитель: 70/20/10, 60/20/20, 50/20/30. Полученные пленки нарезались полосками размером 10×90 мм. Средняя толщина пленок 400 мкм.
2. ИК-спектроскопия. Структура и состав испытуемых образцов до и после воздействия бензина определялись с помощью инфракрасной спектроскопии на спектрометре Tensor 37 (Bruker, Германия). Измерение проводились при следующем режиме: диапазон измерения 4000–600 см<sup>-1</sup>, разрешение 2 см<sup>-1</sup>. Сигнал был усреднен по 32 сканированиям, спектры обработаны в программе OPUS.
3. Изучение оптических характеристик. Для изучения оптических характеристик использовали микроскопа STM6 компании Olympus.

**Экспериментальная часть.** Для проведения испытаний на бензостойкость полученные образцы композитов погружались в среду бензина стандарта АИ-95 с последующим выдерживанием в течение семи суток и последующим высушиванием. ИК спектр снимался в 8 разных точках каждого образца (по 4 с каждой стороны). Итоговые спектры были получены усреднением по восьми точкам в программе OPUS. Все спектры также подверглись нормировке по связи C-CI в ПВХ (пик 636 см<sup>-1</sup>), так как ПВХ наиболее устойчив к воздействию среды бензина.

Для исследования стойкости полимерных пленок к воздействию молочнокислых среды образцы помещались в инкубационную тестовую среду (ИТС), состоящую из 300 мл молока с массовой долей жира 2,5% и 30 мл микробной закваски – кефира с массовой долей жира 1%. После этого образцы инкубировали в течение шести суток с регулярной заменой 40 об.% ИТС [6].

Исследование устойчивости к почвенному биогеоценозу проводилось в течение 120 суток. Для этого образцы помещали в открытый грунт, заранее отобранный в Волосовском районе Ленинградской области. Образцы закапывались на глубину 3–4 см и выдерживались необходимое время. По истечении 90 суток образцы выкапывали, промывали в проточной воде и высушивали в течение суток.

**Результаты и обсуждения.** Научный интерес представляют полученные ИК спектры образцов, а именно их отличия для образцов до и после воздействия агрессивных факторов.

Для спектров образцов после воздействия бензина характерно увеличение интенсивности пика колебаний C-H<sub>3</sub> и уменьшение интенсивности пика для колебаний C-H<sub>2</sub> (область от 2900 см<sup>-1</sup> до 2750 см<sup>-1</sup>). Это может указывать на вымывание из состава композита какого-то высокомолекулярного компонента. Также для этих образцов наблюдаются пики, характерные для кристаллического ПГБ (1275, 1227 и 979 см<sup>-1</sup>), которые отсутствуют на ИК-спектрах образцов до их погружения в бензин. Также отмечается смещение характеристического для смесей ПВХ/ПГБ пика из области 1734 см<sup>-1</sup> в область 1723 см<sup>-1</sup>, характерную для колебания карбоксильной группы в кристаллической фазе ПГБ [7].

Для спектров образцов после их тестирования на устойчивость к воздействию почвенного биогеоценоза не обнаружено значимых структурных изменений.

Единственное различие имеется только в контуре полос поглощения характерных для валентных колебаний связи C-H (2970–2850  $\text{cm}^{-1}$ ) для образцов до и после воздействия среды, что может говорить о разложении какого-то компонента данного композита.

По данным исследования стойкости образцов, содержащих в составе еловую муку и муку без лигнина, к воздействию кисломолочной среды установлено, что в диапазоне длин волн от 3030 до 920  $\text{cm}^{-1}$  прослеживается достоверное увеличение интенсивности пиков и увеличение разброса по интенсивности, что может свидетельствовать об увеличении неоднородности образцов и разрыхлении структуры. Принимая во внимание что интенсивность пика на частоте 3510–3030  $\text{cm}^{-1}$ , связанного с колебаниями групп -OH не изменяется, можно предположить что разрыхление структуры образцов связано со структурными изменениями ПГБ. Для образцов, содержащих в своем составе рисовую шелуху, отмечается снижение интенсивности пиков в диапазоне 3030–2800  $\text{cm}^{-1}$ , связанных с колебаниями атомов входящих в состав ПГБ, что говорит об уменьшении концентрации ПГБ в образцах. На остальных частотах качественных изменений не обнаружено.

**Заключение.** В результате проведенного исследования (рис. 1–3) установлено, что наибольшее воздействие на структурных характеристики древесно-полимерных композитов оказывает среда бензина. Об этом свидетельствует появление пиков характерных для кристаллической фазы ПГБ, что может быть обусловлено растворением ПГБ в бензине и его осаждением на поверхности пленок.

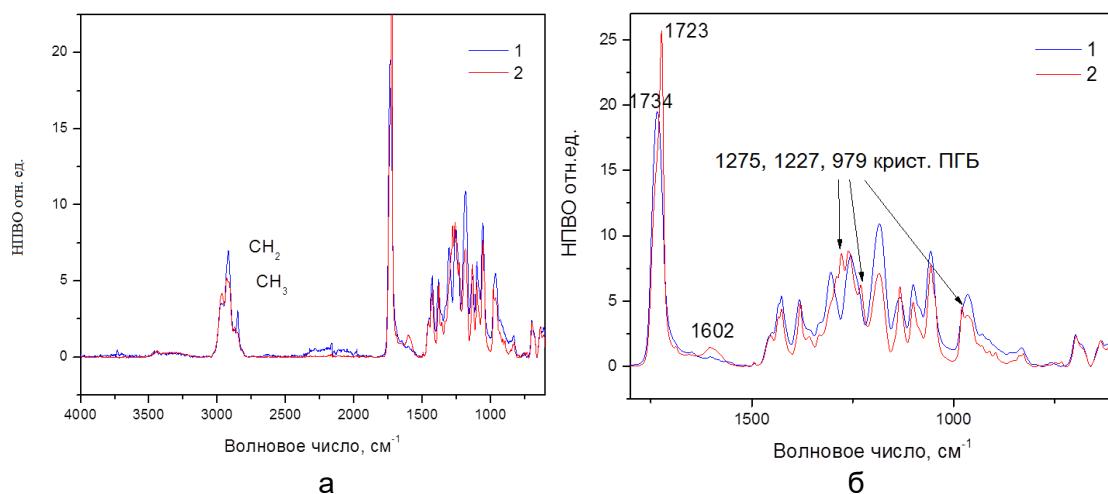


Рис. 1. ИК спектры исследуемых древесно-полимерных композитов до (1) и после обработки бензином (2)

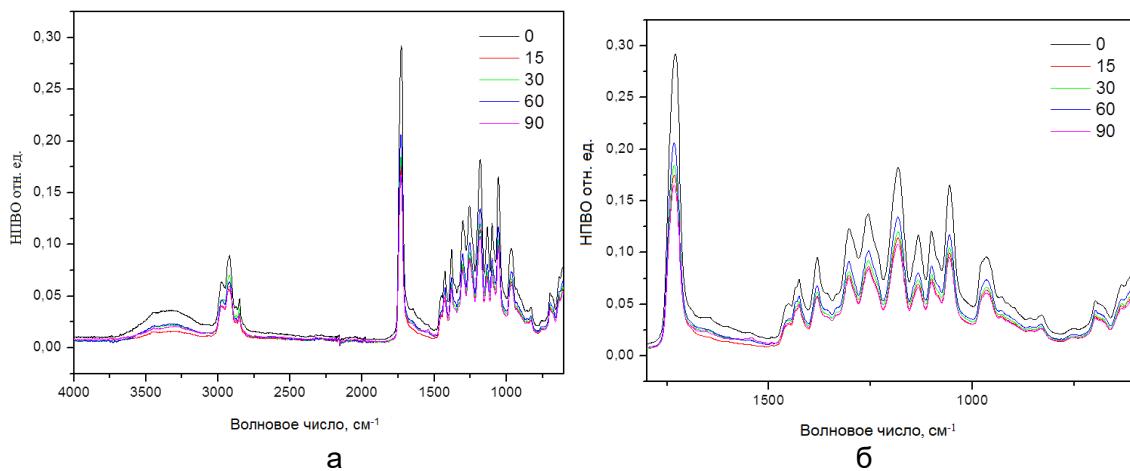


Рис. 2. ИК спектры полимерных композитов различных составов до, вовремя и после воздействия почвенного биогеоценоза (время указано в сутках)

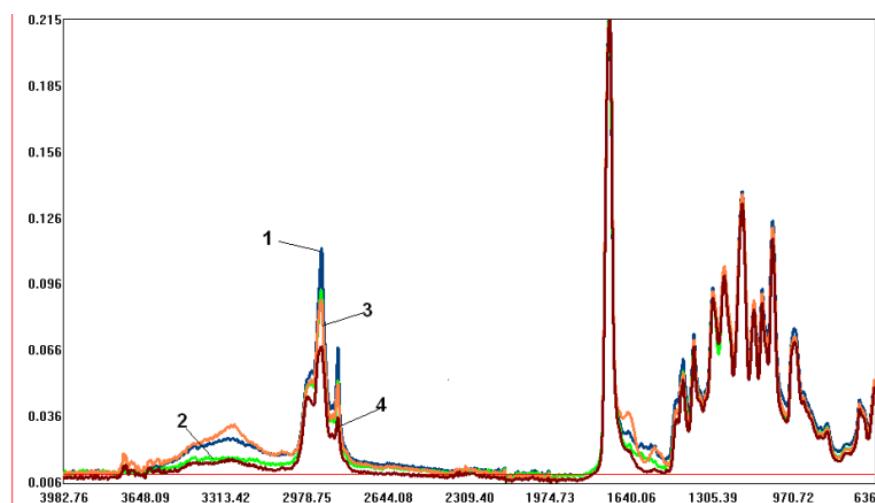


Рис. 3. ИК спектры композитов до и после воздействия кисломолочной среды

При исследовании устойчивости пленок к воздействию почвенного биогеоценоза не получено убедительных данных, позволяющих судить об изменении структуры образцов, а значит о протекании процесса их деградации.

По данным тестирования образцов на устойчивость к воздействию кисломолочной среды можно сделать вывод о том, что образцы становятся более рыхлыми по структуре, при этом структурные изменения связаны воздействием кисломолочной среды на структуру ПГБ. Для серии образцов, содержащих в своей структуре рисовую шелуху отмечается снижение интенсивности пиков ПГБ, что может говорить о снижении его концентрации за счет жизнедеятельности кисломолочных бактерий.

### Литература

1. Durosinmi A. et al. Mechanical and structural changes of PVC when subjected to heat. – 2015. – 118 p.
2. Биоразлагаемые полимерные смеси и композиты из возобновляемых источников / Под ред. Лонг Ю.; пер. с англ. под ред. В.Н. Кулезнева. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. – 464 с.
3. Гузеев В.В. Структура и свойства наполненного ПВХ. – СПб.: Научные основы и технологии, 2012. – 284 с.
4. Kann Y. Green technology for modification of poly(vinylchloride) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/313643477\\_Green\\_technology\\_for\\_modification\\_of\\_polyvinyl\\_chloride](https://www.researchgate.net/publication/313643477_Green_technology_for_modification_of_polyvinyl_chloride), своб.
5. Клесов А. Древесно-полимерные композиты. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 736 с.
6. Сибирцев В.С. и др. Исследование биодеградации, а также антимикробных свойств поливинилхлоридных пленок с добавками пектина и крахмала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18. – № 1. – С. 43–49.
7. Kann Y., Shurgalin M., Krishnaswamy R.K. FTIR spectroscopy for analysis of crystallinity of poly (3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) polymers and its utilization in evaluation of aging, orientation and composition // Polymer Testing. – 2014. – V. 40. – P. 218–224.

УДК 678.743.22

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПВХ

Самуйлова Е.О.<sup>1</sup>, Маркова Е.В.<sup>1</sup>, Успенская М.В.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Успенская М.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В ходе работы было изучено влияние агрессивной среды бензина на термические характеристики полимерных композитов на основе поливинилхлорида, полигидроксибутират и растительного наполнителя.

**Ключевые слова:** ПВХ композиты, поливинилхлорид, полигидроксибутират, древесно-полимерные композиты, бензостойкость, температура стеклования.

**Введение.** Полимерные материалы широко используются в различных сферах деятельности человека. Они нашли свое применение в таких отраслях промышленности как машиностроение, медицина, оптика и фотоника, и особенно в производстве товаров народного потребления, успешно заменяя традиционные материалы (металл, стекло и т.д.). Новые области использования накладывают определенные требования на эксплуатационные (физико-механические, термические и т.д.) характеристики полимеров. В связи с этим проблемы разработки новых и усовершенствования уже существующих рецептур полимерных материалов остаются актуальными и по сей день.

Одно из таких требований, предъявляемое к полимерным материалам, например, в нефтехимической, автомобилестроительной областях – бензостойкость.

Известно, что хорошую бензостойкость имеет поливинилхлорид (ПВХ), что подтверждается рядом работ [1–3], в которых показано, что включение ПВХ в состав полимерной композиции приводит к увеличению стойкости композита к воздействию масел, бензина и его паров. Однако, сам ПВХ обладает низкой тепловой стабильностью (тепловое старение начинается уже при 100°C) и высокой вязкостью. Это значительно осложняет его переработку. Для улучшения эксплуатационных свойств в материал включают множество добавок, таких как пластификаторы, наполнители, смазки, термостабилизаторы, красители и т.д. [4].

Ранее было замечено, что ПВХ имеет хорошую совместимость с полигидроксибутиратом (ПГБ) [5]. Для полимерных пленок на основе ПВХ и ПГБ при их исследовании оптическими методами наблюдается однородная структура. Из термограмм, полученных методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) видно, что для всех смесей ПВХ/ПГБ отсутствуют температурные пики, характерные для температур стеклования чистых компонентов, вместо них наблюдается один характерный пик для смеси, который зависит от соотношения ПВХ и ПГБ.

ПГБ – это наиболее распространенный представитель семейства полигидроксилканоатов, «внутриклеточных биополимеров, синтезируемых многими бактериями как внутриклеточный углерод и аккумулирующих энергию гранулы» [6]. ПГБ является достаточно хрупким и склонным к термической деструкции полимером. Кроме того, ПГБ это дорогостоящий полимер, главным образом, из-за способа его получения. Именно поэтому использование его совместно с более дешевым ПВХ – перспективное направление для создания композиционных материалов с заданными свойствами.

Известно, что в результате протекания реакции горения (а это самый распространенный способ утилизации полимеров) из ПВХ выделяется ядовитый хлористый водород (HCl) [7], поэтому целесообразно уменьшить долю ПВХ в общей массе композита. Из-за большой стоимости ПГБ уменьшение доли ПВХ за счет увеличения ПГБ нерентабельно, так как это неизбежно приведет к росту цен на

полученный на основе данного композита материал. Решением поставленной задачи может стать включение в композит дешевого растительного наполнителя.

В качестве растительного наполнителя может быть использована древесная мука или опилки, сельскохозяйственные растительные остатки (резаные, измельченные или дробленые) и другие виды натурального волокна, например, пенька, джут и кенаф, которые обычно являются побочным продуктом соответствующего промышленного процесса. Присутствующие в них компоненты (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин и др.) также могут повлиять на конечные свойства полученного композита [7], в том числе и на бензостойкость.

И если влияние доли пластификатора на бензостойкость ПВХ композитов изучено достаточно хорошо [4], и даже ведутся работы по созданию бензостойких пластификаторов [8–10], то литературы, посвященной исследованию влияния на устойчивость материалов в среде бензина от природы наполнителя, незначительно.

Таким образом, раскрываемая в данной работе проблема изучения влияния агрессивной среды бензина на термические свойства полимерных композитов на основе поливинилхлорида, ПГБ и растительного наполнителя является актуальной.

### **Материалы и методы**

1. Изготовление полимерных пленок. Пленки были получены в лаборатории ООО «Клекнер Пентопласт Рус» из готовой промышленной порошкообразной композиции на основе непластифицированного ПВХ, гранулированного ПГБ марки «Kaneka Aonilex X131A» и растительных наполнителей: еловой муки, древесной муки без лигнина марки «Arbocel» и рисовой шелухи. Использовался метод вальцевания расплава смеси компонентов на цилиндрических вальцах диаметром 150 мм при скорости вальцов 24 оборота в минуту и температуре 175°C. Составы полученных пленок отвечают следующим соотношениям: ПВХ/ПГБ/растительный наполнитель: 70/20/10, 60/20/20, 50/20/30.
2. ИК-спектроскопия. Структура и состав испытуемых образцов до и после воздействия бензина определялись с помощью инфракрасной спектроскопии на спектрометре Tensor 37 (Bruker, Германия). Измерение проводились при следующем режиме: диапазон измерения 4000–600 см<sup>-1</sup>, разрешение 2 см<sup>-1</sup>. Сигнал был усреднен по 32 сканированиям, спектры обработаны в программе OPUS.
3. Изучение термических свойств. Для изучения термических свойств образцов были сняты термограммы ДСК на DSC 204 F1 Phoenix (Нетш, Германия), работающем со скоростью нагрева 10 К/мин в диапазоне температур от минус 30°C до 175°C.

**Экспериментальная часть.** Для проведения испытаний на бензостойкость полученные образцы композитов нарезались размером 20×50 мм и погружались в среду бензина стандарта АИ-95 с последующим выдерживанием в течение семи суток и высушиванием. ИК спектр снимался в 8 разных точках каждого образца (по 4 с каждой стороны). Итоговые спектры были получены усреднением по восьми точкам в программе OPUS. Все спектры также подверглись нормировке по связи C-Cl в ПВХ (пик 636 см<sup>-1</sup>), так как ПВХ наиболее устойчив к воздействию среды бензина.

Методом ДСК были определены температуры стеклования до и после выдержки образцов в среде бензина.

**Результаты и обсуждения.** Научный интерес представляют полученные ИК-спектры образцов (рисунок), а именно их отличия для образцов до и после выдержки в бензине. Так, для всех них характерна следующая закономерность: увеличение интенсивности пика колебаний C-H<sub>3</sub> и уменьшение интенсивности пика для колебаний C-H<sub>2</sub> (область от 2900 см<sup>-1</sup> до 2750 см<sup>-1</sup>). Это может указывать на вымывание из состава

композита какого-то высокомолекулярного компонента. Вместе с тем, на спектрах образцов, прошедших испытание на бензостойкость, наблюдаются пики, характерные для кристаллического ПГБ (1275, 1227 и 979  $\text{см}^{-1}$ ), отсутствовавшие на ИК спектрах образцов до их погружения в бензин. Также отмечается смещение характеристического для смесей ПВХ/ПГБ согласно работе [6] пика из области 1734  $\text{см}^{-1}$  в область 1723  $\text{см}^{-1}$ , характерную для колебания карбоксильной группы в кристаллической фазе ПГБ [6, 11].

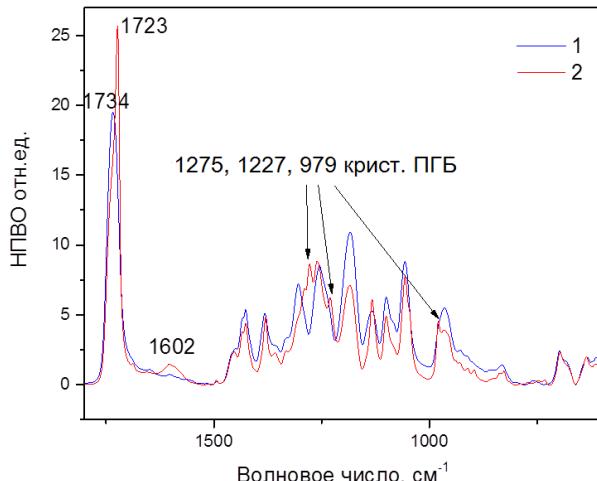


Рисунок. ИК спектры исследуемых древесно-полимерных композитов до (1) и после обработки бензином (2)

Предполагаем, что это может быть связано с выпотеванием ПГБ, который здесь ведет себя как пластификатор, и его концентрацией на поверхности растительного наполнителя с последующей кристаллизацией. Это также объясняет, увеличение интенсивности пиков кристаллического ПГБ при повышении массовой доли растительного наполнителя. Известно, что лигнин является нуклеирующим агентом [7], способствующим кристаллизации ПГБ, однако, существенная разница спектров образцов с наполнителем без лигнина и с лигнином не наблюдается. Это может быть обусловлено большей дисперсностью муки без лигнина, по сравнению с еловой мукой, а значит и большей площадью поверхности наполнителя для формирования центров кристаллизации.

Несмотря на подобное кажущееся расслоение ПВХ и ПГБ, установлено, что температуры стеклования исследуемых образцов до и после испытания на бензостойкость по-прежнему имеют одно значение для каждой смеси, но и мало отличаются друг от друга. Отсутствие ярко выраженной динамики изменения температуры стеклования у образцов до и после выдержки в бензине позволяет заключить, что воздействие агрессивной среды бензина не влечет за собой значимых изменений термических свойств материалов [12].

**Заключение.** В данной работе были рассмотрены результаты испытания на бензостойкость образцов пленок из полимерных композитов на основе ПВХ и ПГБ с растительными наполнителями. Обнаружено, что агрессивная среда оказывает влияние на структуру исследуемых композитов, но не оказывается на их термических свойствах.

### Литература

1. Durosini A. et al. Mechanical and structural changes of PVC when subjected to heat. – 2015. – 118 с.
2. Phiriyawirut M., Luamlam S. Influence of poly (vinyl chloride) on natural rubber/chlorosulfonated polyethylene blends // Open Journal of Organic Polymer Materials. – 2013. – V. 3. – № 4. – P. 81.

3. Omran A.M. et al. Mechanical and oil resistance characteristics of rubber blends based on nitrile butadiene rubber // KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe. – 2010. – V. 63. – № 5. – P. 197–202.
4. Гузеев В.В. Структура и свойства наполненного ПВХ. – СПб.: Научные основы и технологии, 2012. – 284 с.
5. Kann Y. Green technology for modification of poly(vinylchloride) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/313643477\\_Green\\_technology\\_for\\_modification\\_of\\_polyvinyl\\_chloride](https://www.researchgate.net/publication/313643477_Green_technology_for_modification_of_polyvinyl_chloride), своб.
6. Биоразлагаемые полимерные смеси и композиты из возобновляемых источников / Под ред. Лонг Ю.; пер. с англ. под ред. В.Н. Кулезнева. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. – 464 с.
7. Клесов А. Древесно-полимерные композиты. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 736 с.
8. Мазитова А.К. и др. Новые пластификаторы ПВХ-композиций специального назначения // Башкирский химический журнал. – 2015. – Т. 22. – № 3. – С. 23–26.
9. Mazitova A.K. et al. New plasticizers for PVC-compositions in construction // Nanotekhnologii v Stroitel'stve. – 2017. – V. 9. – № 4. – P. 48–63.
10. Файзуллина Г.Ф. Разработка маслобензостойких ПВХ-пластикатов на основе новых несимметричных фталатных пластификаторов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Уфа: Уфимский гос. нефтяной технический университет, 2017. – 134 с.
11. Kann Y., Shurgalin M., Krishnaswamy R.K. FTIR spectroscopy for analysis of crystallinity of poly (3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) polymers and its utilization in evaluation of aging, orientation and composition // Polymer Testing. – 2014. – V. 40. – P. 218–224.
12. Sitnikova V.E., Uspenskaya M.V., Chereneva S.V., Samuilova E.O., Nosenko T.N. Thermal properties of polymer composites based on polyvinylchloride film and biopolymer filler // 18<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2018. – V. 18. – P. 987–994.

УДК 535.343.2

ПРОЗРАЧНЫЕ ФОТОАКТИВНЫЕ  $ZnO$ - $MgO$ - $Ag_2O$  ПОКРЫТИЯСаратовский А.С.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.хим.н., профессор Евстропьев С.К.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе приведены результаты синтеза и исследования оптических свойств, прозрачных  $ZnO$ - $MgO$ - $Ag_2O$  покрытий, сформированных полимерно-солевым методом на стеклах. Оптические свойства покрытий были исследованы методами оптической спектроскопии и фотолюминесценции. Структура оксидных покрытий была исследована в работе методами рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что увеличение содержания серебра в покрытиях приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны материала. Показано, что покрытия характеризуются высокой прозрачностью в видимой части спектра и обладают способностью генерировать синглетный кислород под действием УФ излучения (370 нм) и синего света (405 нм).

**Ключевые слова:** оксидное покрытие, спектр поглощения, поливинилпирролидон (ПВП), синглетный кислород, ширина запрещенной зоны.

**Введение.** В настоящее время разработке прозрачных фотоактивных покрытий различного назначения посвящены многочисленные исследования. Среди различных фотоактивных материалов выделяются покрытия на основе оксидов титана и/или цинка, характеризующиеся высокой стабильностью, термостойкостью и механической прочностью, фотокаталитическими и бактерицидными свойствами, что является важным для многих практических приложений [1–4].

Одной из важных для практики направлений развития фотокаталитических материалов является расширение спектрального диапазона их фоточувствительности в длинноволновую область. Это может обеспечить повышение их эффективности при использовании солнечного света в качестве источника излучения. Смещение фоточувствительности фотокатализаторов в длинноволновую часть спектра достигается за счет применения гетероструктурных композиций, содержащих, наряду с  $ZnO$  и/или  $TiO_2$ , связанные с ними полупроводниковые частицы с меньшей шириной запрещенной зоны. Другой подход к увеличению чувствительности фотокатализатора к видимому свету состоит во введении в его структуру тонких пленок или наночастиц металлов.

Одним из основных механизмов, определяющих фотокаталитические и бактерицидные свойства оксидных материалов, является генерация синглетного кислорода и других химически активных кислородных соединений. Поэтому исследование процессов фотостимулированной генерации этих соединений является важным этапом разработки новых фотоактивных материалов.

Хорошо известно, что структура и оптические свойства оксидных покрытий существенно зависят от методов и условий их получения. Для формирования прозрачных фотоактивных оксидных покрытий используются различные способы: золь-гель процессы, распылительный пиролиз, полимерно-солевой метод и другие.

Жидкостной полимерно-солевой метод получения оксидных покрытий основан на использовании пленкообразующих растворов, содержащих соли металлов и растворимый органический полимер, обеспечивающий высокую адгезию растворов к поверхности подложки и высокую однородность формируемых оксидных покрытий. Этот метод прост, экономичен, универсален и не требует сложного технологического оборудования.

Макроскопические кристаллы оксида цинка, наночастицы  $ZnO$  и покрытия на основе оксида цинка обладают способностью генерировать синглетный кислород под действием светового излучения, обладают фотокаталитическими и бактерицидными

свойствами и перспективны для применения в медицине. Установлено, что бактерицидные свойства оксида цинка и его способность к генерации синглетного кислорода существенного возрастают при введении в состав материала модифицирующих добавок.

Известно что органо-неорганические композиты, содержащие частицы  $\text{AgNO}_3$ , диспергированные в полимерной матрице, характеризуются высокими фотокаталитическими и бактерицидными свойствами и перспективны для практических приложений.

Целью работы был синтез  $\text{ZnO}-\text{MgO}-\text{Ag}_2\text{O}$  покрытий полимерно-солевым методом, исследование их спектральных свойств и способности генерировать синглетный кислород под действием светового излучения.

**Методика эксперимента.** В качестве исходных компонентов для получения оксидных покрытий использовались водные растворы нитратов цинка, магния и серебра. Для получения пленкообразующих композиций растворы нитратов металлов смешивались с растворами ПВП при комнатной температуре с помощью магнитной мешалки. Полученные жидкие композиции представляли собой однородные прозрачные жидкости. В качестве подложек использовались покровные стекла для микроскопов, имеющие толщину 0,1 мм. Нанесение покрытий на подложки осуществлялось путем нанесения на поверхность стекла небольшого количества раствора или погружения стеклянных пластин в пленкообразующие растворы с последующим извлечением и сушкой. Процесс сушки покрытий осуществлялся на воздухе при комнатной температуре. После завершения сушки, стекла с покрытиями помещались в электрическую муфельную печь и подвергались термообработке при температуре 550°C в течение 2 ч. Использованный нами температурно-временной режим термообработки композиционных покрытий, состоящих из ПВП и нитратов металлов, применялся ранее и обеспечивал полное разложение нитратов и полимера и формирование однородных оксидных покрытий.

Измерения спектров поглощения материалов выполнялись на спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 3500 в диапазоне 250–800 нм. Для измерения спектров поглощения и УФ облучения исследуемые растворы помещались в кварцевую кювету.

Определение способности синтезированных оксидных покрытий к генерации синглетного кислорода осуществлялось путем измерения спектров фотолюминесценции покрытий в ближней ИК области спектра. Для возбуждения фотолюминесценции материала использовалось излучение светодиода HPR40E-50UV (максимум полосы генерации 370 нм). Спектры люминесценции исследовались на спектрометре SDH-IV (SOLAR Laser Systems, Республика Беларусь).

**Результаты.** Отметим, что все полученные в настоящей работе образцы характеризуются высокой прозрачностью в видимой и ближней УФ частях спектра, что свидетельствует об отсутствии в структуре покрытий крупных оптических неоднородностей.

На рис. 1, а представлены спектры поглощения образцов стекол с композиционными покрытиями типа «ПВП/нитраты металлов». Из рисунка видно, что в спектрах образцов области 450–500 нм не проявляется полоса, характерная для плазмонного поглощения  $\text{Ag}^0$  наночастиц.

Термообработка образцов привела к формированию на поверхности стекла оксидных покрытий. На рис. 1, б представлены данные рентгенофазового анализа  $\text{ZnO}-\text{MgO}-\text{Ag}_2\text{O}$  покрытия, сформированного на поверхности стекла после термообработки при 550°C в течение 2 ч. На приведенной дифрактограмме покрытия видны пики

гексагональных кристаллов ZnO, имеющих структуру вюрцита. Расчеты показали, что размер ZnO кристаллов составляет 37 нм.

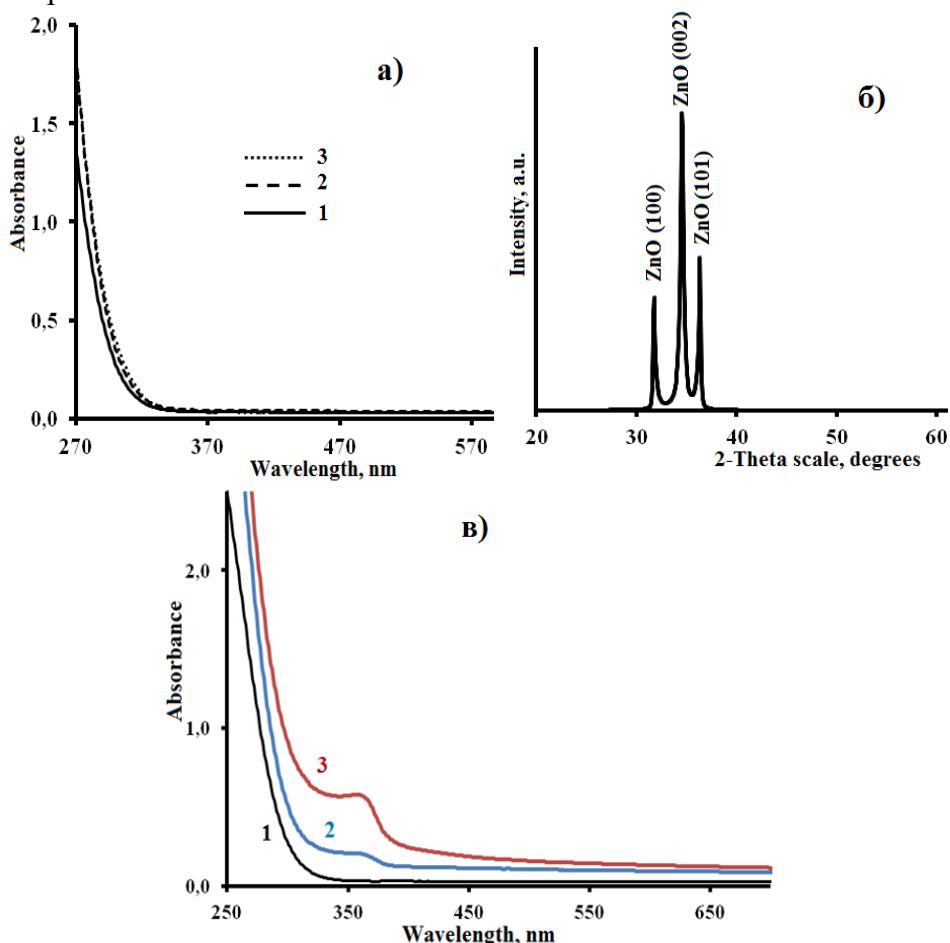


Рис. 1. Спектры поглощения: исходного стекла (кривая 1), стекла с композиционным покрытием, содержащим, масс. % : ПВП 75,8; Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 23,7; Ag(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 0,3; Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 0,2 (кривая 2) и стекла с композиционным покрытием, содержащим, масс. % : ПВП 74,8; Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 23,5; Ag(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 1,5; Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 0,2 (кривая 3) (а); дифрактограмма покрытия 3, сформированного на поверхности стекла (б); Спектры поглощения стекла без покрытия (кривая 1); стекла с покрытием (кривая 2 и 3) (в)

Пространственная ориентация преимущественного направления роста ZnO кристаллов была оценена при использовании значения коэффициента текстуры  $TC_{(hkl)}$ . Значительное отклонение величины текстуры  $TC_{(002)}$  кристаллов ZnO в покрытии от единицы ( $TC_{(002)} > 1$ ) указывает на их преимущественную ориентацию вдоль плоскости (002) в направлении перпендикулярном поверхности стекла. Такой вид дифрактограмм кристаллов оксида цинка часто наблюдается при их росте на предварительно осажденных затравочных кристаллах при диффузии компонентов в направлении перпендикулярном поверхности из жидкой или газовой фазы, или при формировании тонких слоев ZnO кристаллов при тесном контакте с поверхностью стеклянной подложки.

Сопоставление параметров кристаллической решетки ZnO в покрытии с данными традиционных объемных образцов ZnO (JCPDS card No. 36-1451) показывает, что размеры кристаллической ячейки кристаллов, сформировавшихся на поверхности стекла, несколько меньше стандартных значений.

На рис. 1, в приведены спектры поглощения образцов стекол с оксидными ZnO-MgO-Ag<sub>2</sub>O покрытиями, полученными после термообработки. Видно, что стекла с

покрытиями в целом характеризуются довольно высокой прозрачностью в видимой части спектра.

В УФ области в спектрах покрытий наблюдается характерная для кристаллов ZnO экситонная полоса поглощения с максимумом  $\lambda \sim 370$  нм. Отметим, что интенсивность этой полосы поглощения существенно возрастает при увеличении содержания серебра в покрытиях.

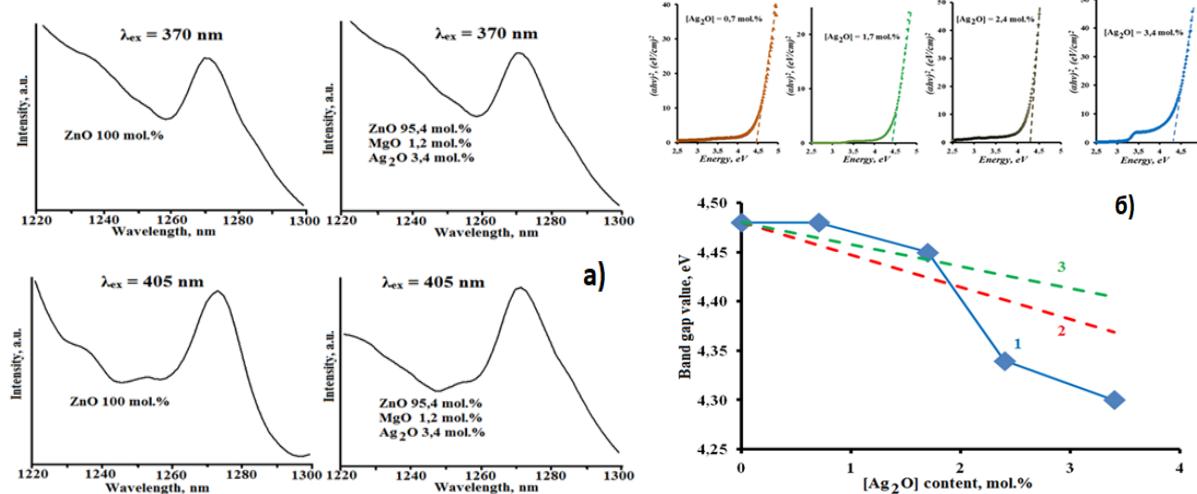


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции: спектры фотолюминесценции ( $\lambda_{\text{ex}}=370$  и 405 нм) в ближней ИК области спектра образцов стекол с покрытиями (а); зависимости  $(ahv)^2=f(hv)$  для оксидных ZnO-MgO-Ag<sub>2</sub>O покрытий с различным содержанием Ag<sub>2</sub>O. Зависимости ширины запрещенной зоны материала покрытий от содержания Ag<sub>2</sub>O. Данные, полученные из эксперимента, используя уравнение Таука (кривая 1); расчет по уравнению при  $E_g^{\text{Ag}_2\text{O}}=1,3$  эВ (кривая 2); расчет по уравнению при  $E_g^{\text{Ag}_2\text{O}}=2,25$  эВ (кривая 3) (б)

На рис. 2, а приведены спектры фотолюминесценции полученных покрытий в ближней ИК области спектра при возбуждении светом с длиной волны 370 нм и 405 нм. Видно, что в спектрах всех покрытий наблюдается полоса люминесценции с максимумом  $\lambda=1270$  нм, характерная для синглетного кислорода. Наблюданная относительно небольшая интенсивность этой полосы определяется малой толщиной полученных нами покрытий. Сочетание высокой прозрачности полученных покрытий в видимой части спектра с их способностью генерировать химически активный синглетный кислород под действием УФ излучения определяет перспективность их использования для формирования фотоактивных компонентов медицинской техники.

Для расчета величин ширины запрещенной зоны в полученных полупроводниковых оксидных нанокристаллах использовалось уравнение Таука:

$$(ahv)^2 = A(hv - E_g). \quad (1)$$

Полученные значения  $E_g$  для покрытий, не содержащих серебра, составляли 4,51 эВ, что заметно превосходит величину  $E_g$  макроскопических кристаллов оксида цинка ( $\sim 3,37$  эВ). Это может быть связано как с небольшим изменением химического состава покрытий при введении в их состав MgO, так и с незавершенностью процессов структурообразования материалов покрытий.

Ширина запрещенной зоны Ag<sub>2</sub>O значительно меньше, чем у оксидов цинка и магния. Для оценки характера изменения  $E_g$  при варьировании химического состава в двухкомпонентных полупроводниковых материалах, состоящих из полупроводников А и В, применялось предположение выполнимости закона Вергарда:

$$E_g^{AB} = xE_g^A + (1-x)E_g^B - bx(1-x). \quad (2)$$

Уравнение (2) было применено для описания характера изменения  $E_g$  в двухкомпонентных композиционных материалах ZnO-MgO. В уравнении использовалась линейная аппроксимация зависимости  $E_g$  от мольной доли MgO ( $b=0$ ), несмотря на существенное различие в величинах  $E_g^{\text{ZnO}}$  и  $E_g^{\text{MgO}}$ . Учитывая, что формальное изменения химического состава материала покрытий невелико оценим изменение  $E_g$  материала покрытия при увеличении содержания в нем Ag<sub>2</sub>O. Если материал синтезированных нами покрытий условно рассматривать как двухкомпонентный (ZnO-MgO (компонент 1) и Ag<sub>2</sub>O (компонент 2)), то уравнение Вергарда можно записать в виде:

$$E_g^{(\text{ZnO/MgO})-\text{Ag2O}} = x_{\text{Ag2O}} E_g^{\text{Ag2O}} + (1-x_{\text{Ag2O}}) E_g^{(\text{ZnO/MgO})} - bx_{\text{Ag2O}}(1-x_{\text{Ag2O}}), \quad (3)$$

где  $E_g^{(\text{ZnO/MgO})-\text{Ag2O}}$  – ширина запрещенной зоны материала покрытий;  $E_g^{(\text{ZnO/MgO})}$  и  $E_g^{\text{Ag2O}}$  – значения ширины запрещенной зоны его компонентов;  $x_{\text{Ag2O}}$  – мольная доля Ag<sub>2</sub>O в покрытиях. Учитывая, что величина  $x_{\text{Ag2O}}$  мала и полагая, что значение  $b$  невелико, изменение ширины запрещенной зоны  $E_g^{(\text{ZnO/MgO})-\text{Ag2O}}$  материала покрытия при увеличении мольной доли Ag<sub>2</sub>O выражается линейной зависимостью от  $x_{\text{Ag2O}}$  то:

$$E_g^{(\text{ZnO/MgO})-\text{Ag2O}} = E_g^{(\text{ZnO/MgO})} + (E_g^{\text{Ag2O}} - E_g^{(\text{ZnO/MgO})}) \cdot x_{\text{Ag2O}}. \quad (4)$$

Для сопоставления с экспериментальными данными, приведенными на рис. 1, в, нами были построены (рис. 2, б) расчетные зависимости, используя уравнение Вергарда и различные значения  $E_g^{\text{Ag2O}}$ , приведенные в литературе для тонких пленок Ag<sub>2</sub>O ( $E_g^{\text{Ag2O}}=1,3$  эВ (кривая 2) и  $E_g^{\text{Ag2O}}=2,25$  эВ (кривая 3)). Сопоставление экспериментальных данных (кривая 1) с результатами расчетов (кривые 2, 3) показывает, что расчетные кривые правильно отражают тенденцию изменения  $E_g$  материала покрытия с увеличением содержания в нем Ag<sub>2</sub>O. Однако при высоких содержаниях Ag<sub>2</sub>O экспериментально определенные значения  $E_g^{(\text{ZnO/MgO})-\text{Ag2O}}$  существенно меньше расчетных значений. Таким образом, наблюдаемое в настоящей работе существенное уменьшение ширины запрещенной зоны материала покрытий при увеличении содержания в них Ag<sub>2</sub>O может быть связано как с изменением их химического состава, так и с изменением структуры покрытий.

**Заключение.** Полимерно-солевой метод, основанный на использовании пленкообразующих растворов, содержащих соли металлов и растворимый органический полимер, позволяет сформировать на поверхности стекол фотоактивные ZnO-MgO-Ag<sub>2</sub>O покрытия. Покрытия характеризуются прозрачностью в видимой части спектра, обладают способностью генерировать синглетный кислород под действием УФ излучения и состоят из оксидных наночастиц, имеющих размер около 30 нм. Ширина запрещенной зоны материала покрытий существенно уменьшается при увеличении содержания Ag<sub>2</sub>O в материале покрытия.

## Литература

1. Evstropiev S.K. et al. Transparent bactericidal coatings based on zinc and cerium oxides // Ceramics International. – 2017. – V. 43. – № 16. – P. 14504–14510.
2. Евстропьев С.К. и др. Фотокаталитические прозрачные покрытия на поверхности наконечников волоконно-оптических жгутов медицинского назначения // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – № 12. – С. 1125–1127.
3. Дукельский К.В., Евстропьев С.К. Формирование наноразмерных MgO-покрытий на поверхности стекла // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 1. – С. 58–64.
4. Киселев В.М., Кисляков И.М., Бурчинов А.Н. Генерация синглетного кислорода на поверхности оксидов металлов // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 120. – № 4. – С. 545–555.

УДК 620.3, 535.14

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕКАРСТВЕННЫХ  
ПРЕПАРАТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ**

В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Симонов А.А.<sup>1</sup>, Грачев Я.В.<sup>1</sup>, Смолянская О.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Смолянская О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В данный момент ведется активная разработка новых методов неинвазивного мониторинга патологических процессов в живом организме. Перспективным способом визуализации патологических процессов является применение терагерцового излучения с использованием наночастиц в качестве контрастирующих агентов. В представленной работе были исследованы оптические и диэлектрические особенности магнитных наночастиц на основе оксида железа (II) и оксида железа (III). Анализ полученных результатов подтвердил актуальность использования методов терагерцовой спектроскопии в области клинической медицины, связанной с использованием наночастиц.

**Ключевые слова:** терагерцовая спектроскопия, магнитные наночастицы, показатель преломления, коэффициент поглощения, диоксид кремния.

**Введение.** Одной из важных проблем клинической медицины на данный момент является доставка лекарственных препаратов в зону ишемического повреждения для детектирования, диагностики или лечения различных заболеваний. Данную проблему можно решить методом, в котором используются магнитные наночастицы (МНЧ) на основе оксида железа. При использовании внешнего магнитного поля можно осуществлять доставку наночастиц в пораженную область, фиксировать факт попадания лекарств в необходимую зону возможно при помощи терагерцового (ТГц) излучения [1]. Преимущества данного метода визуализации заключаются в том, что он является неинвазивным и неионизирующим, что позволяет проводить медицинскую диагностику безболезненно для пациента, не нанося ущерб здоровым тканям.

Разработаны новые методы неинвазивного мониторинга патологических процессов в живом организме с помощью терагерцовой спектроскопии. Результатом настоящей работы является получение спектров коэффициента поглощения и показателя преломления магнитных наночастиц оксида железа в терагерцовом диапазоне частот.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования в данной работе были использованы коллоидные комплексы наночастиц двух видов, измеренные в форме таблеток с полиэтиленом. Содержание наночастиц в таблетках составляло порядка 0,5–1,0 мас.%. Дополнительно в качестве эталонного образца были измерены оптические характеристики гранулы полиэтилена без МНЧ.

Синтезирование наночастиц на основе оксида железа в оболочке из диоксида кремния  $Fe_3O_4$ - $SiO_2$  проводилось из водного раствора хлорида железа(III) и сульфата железа(II), взятых в молярном соотношении 2:1 (МНЧ1) или с 25% водный раствор аммиака и 1% раствор ацетата аммиака (МНЧ2). На поверхности наночастиц лекарственные препараты фиксировались посредством координационного взаимодействия ионов и ковалентного связывания [2]. Выбор диоксида кремния в качестве оболочки МНЧ обусловлен тем, что диоксид кремния является биологически инертным, уменьшая риск заражения пациента, и не уменьшает магнитные свойства наночастиц.

Перечень образцов, которые участвовали в исследовании, представлен в таблице.

Таблица. Исследуемые образцы

Номер образца	Образец	Толщина образца, мм
00	Полиэтилен без НЧ	1,32
1	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> -глюкоза (гидротермальный)	1,20
2	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> -глюкоза	1,20
3	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -глюкоза	1,25
4	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -МНЧ1	1,32
5	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> -NH <sub>2</sub> (АПТЭС)	1,36
6	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> -NH <sub>2</sub> (глицин)	1,26
7	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -NH <sub>2</sub>	1,31
8	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -МНЧ <sub>2</sub>	1,22

Для измерения показателя преломления и коэффициента поглощения образцов использовалось два терагерцовых спектрометра, это было сделано для того, чтобы обнаружить возможное расхождение результатов, полученных на установках с разными энергиями ТГц излучения. Первая серия измерений была проведена при помощи коммерческого спектрометра TPS 3000 в г. Бордо (Франция). Рабочая частотная зона данного спектрометра составляет 0,06–3 ТГц. Во втором этапе измерений использовалась установка, генерирующая широкополосное ТГц (0,08–1,1 ТГц) импульсное излучение нелегированного кристалла арсенида индия, схема установки представлена на рис. 1.

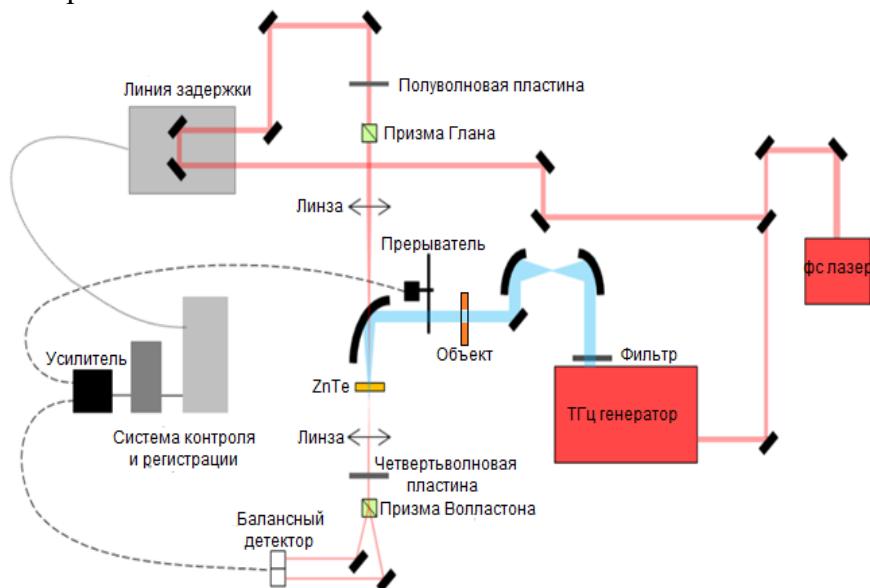


Рис. 1. Схема установки лабораторного макета терагерцового спектрометра (Университет ИТМО)

При помощи лабораторного макета ТГц спектрометра фиксировалась функция временной задержки зондирующего импульса. С использованием программного пакета NI LabVIEW при помощи преобразования Фурье из волновой формы ТГц импульса был получен его частотный спектр:

$$E(\omega) = A(\omega)e^{-i\phi(\omega)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dt E(t) e^{-i\omega t}, \quad (1)$$

где  $E(\omega)$  – зависимость комплексной амплитуды сигнала от частоты;  $A(\omega)$  – амплитудная составляющая;  $\phi(\omega)$  – фазовая составляющая.

Спектральные характеристики объекта можно получить, записывая волновую форму ТГц импульса прошедшего через таблетку и вычисляя спектр по формуле (1). В

данной работе измерялся прошедший сигнал не только через образец-таблетку, но и сигнал без установленного образца, что позволяет рассчитать показатель преломления и коэффициент поглощения по формулам, представленным в работе [2].

**Результаты.** Анализ данных первой серии измерений представлен на рис. 2. По полученным результатам видно, что коэффициент поглощения плавно возрастает в диапазоне от 0,2 ТГц до 0,9 ТГц для всех исследуемых образцов. Расхождение значений коэффициента поглощения начинает возрастать при частоте выше 0,9 ТГц, становится возможным достоверно отличать некоторые образцы с различными закрепленными лекарственными препаратами друг от друга.

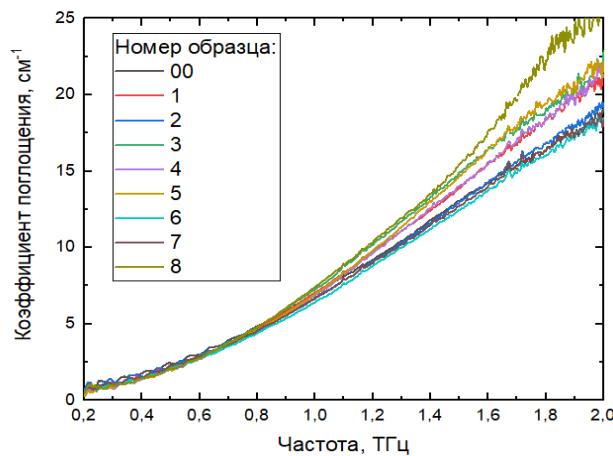


Рис. 2. ТГц спектр коэффициента поглощения. Данные первой серии измерений

Зависимость показателя преломления от частоты представлена на рис. 3. Значения показателя преломления практически для всех образцов различны на всем исследуемом диапазоне частот. В работе [2] при измерении показателя преломления НЧ в оболочке из диоксида кремния и НЧ без оболочки было установлено, что наличие оболочки не влияет на показатель преломления в данном диапазоне частот. Таким образом, можно судить, что отличия в спектрах показателя преломления для разных образцов вызваны препаратами, закрепленными на наночастицах.

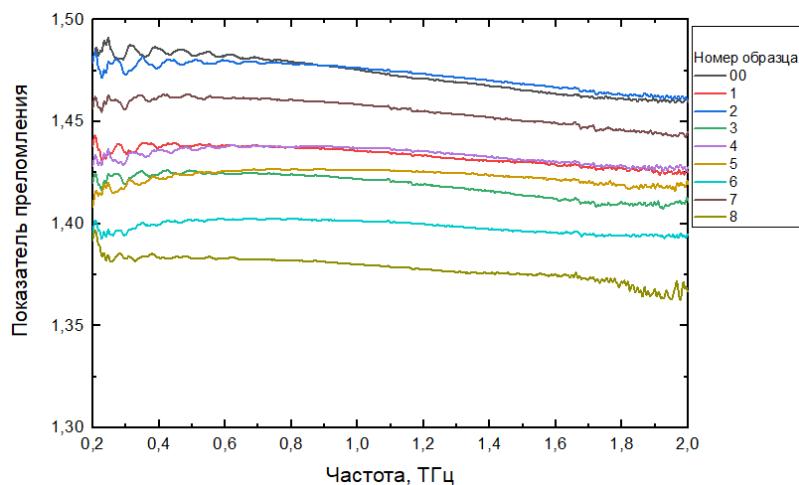


Рис. 3. ТГц спектр показателя преломления. Данные первой серии измерений

Спектры коэффициента поглощения второй серии измерений представлен на рис. 4. Различие в данных первой и второй серии измерений могут быть вызваны тем, что при проведении первой серии эксперимента установка была изолирована от воздействий окружающей среды.

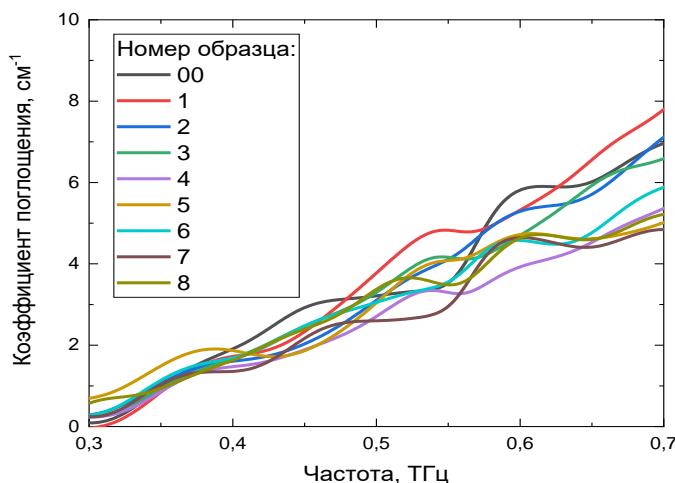


Рис. 4. Спектр коэффициента поглощения. Данные второй серии измерений

**Практическая значимость.** Наблюдаемые оптические свойства лекарственных препаратов на поверхности магнитных наночастиц полезны для разработки новых методов визуализации патологических процессов.

**Заключение.** Исследованы оптические свойства лекарственных препаратов на поверхности магнитных наночастиц в терагерцовом диапазоне частот. Эксперимент проводился при использовании двух различных установок, коммерческого спектрометра TPS 3000 и лабораторного макета терагерцового спектрометра (Университет ИТМО). Было показано, что при частотах выше 0,9 ТГц значения коэффициента поглощения различны для некоторых образцов наночастиц с закрепленными на них лекарственными препаратами и наночастиц без препаратов. Также для всех образцов были получены спектры показателя преломления, позволяющие идентифицировать большую часть исследуемых образцов. Полученные результаты подтверждают актуальность использования методов терагерцовой спектроскопии в области клинической медицины, связанной с использованием наночастиц.

### Литература

1. Lee D.K. et al. Characteristics of gadolinium oxide nanoparticles as contrast agents for terahertz imaging // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2011. – V. 32. – № 4. – P. 506–512.
2. Афонин М.В. и др. Особенности терагерцовых спектров наночастиц оксида железа в оболочке из диоксида кремния и наночастиц оксида и гидроксида железа // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84. – № 8. – С. 16–22.

УДК 535.8, 681.785.5

**СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**Смирнова М.Н.<sup>1</sup>, Арсланбаева Э.И.<sup>1</sup>, Грачев Я.В.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Щипкин А.Н.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе представлена система визуализации напряженности электромагнитного поля импульсного терагерцового излучения. Собрана система быстрого получения изображений в терагерцовом диапазоне в отраженном свете при нормальном падении излучения на объект. Предложенная схема позволяет исследовать объекты из сильноглощающих или непрозрачных материалов.

**Ключевые слова:** терагерцевая спектроскопия с разрешением по времени, импульсное терагерцовое излучение, система визуализации, имиджинг, двумерное электрооптическое измерение в свободном пространстве.

**Введение.** Еще с двадцатого века системы визуализации электромагнитного излучения представляли большой интерес для научного сообщества. Большое значение в их развитии имело открытие и изучение терагерцевого излучения. Интервал частот данного излучения находится в пределах от  $0,3 \cdot 10^{12}$  Гц до  $10 \cdot 10^{12}$ . В этом же интервале излучают многие объекты в космосе, молекулы ДНК, ряд ядовитых и взрывчатых веществ, квантовые точки и т.д. Особый потенциал имеет применение терагерцевого излучения в медицине. Терагерцевое излучение неионизирующее и чувствительно к воде, поэтому с его помощью можно проводить диагностику состояния человеческого тела, исследовать процессы в тканях в режиме реального времени [1]. Поэтому одной из наиболее важных и перспективных задач являются разработка и применение систем визуализации терагерцевого излучения (терагерцевый имиджинг).

**Система визуализации.** Данная система визуализации для импульсного терагерцевого излучения была основана на методе двумерного электрооптического измерения в свободном пространстве. Этот метод относится к активному имиджингу, при этом сгенерированное импульсное излучение проходит через объект или отражается от него, и после этого попадает на детектор. Двумерное электрооптическое измерение в свободном пространстве позволяет собирать данные намного быстрее, чем методами традиционной сканирующей терагерцевой визуализации и терагерцевой визуализации чирпированным пробным лучом, а также обладает наилучшим отношением сигнал/шум [2].

В нашей системе сгенерированное фемтосекундное импульсное излучение с длиной волны 790 нм было направлено на кремниевый светофильтр, в результате чего был получен пучок для регистрации терагерцевого излучения – зондирующий пучок и пучок для генерации терагерцевого излучения – пучок накачки. В качестве генератора терагерцевого излучения используется система TERA-AX, обладающая высокой эффективностью преобразования ИК-ТГц. Мощность генерируемых импульсов может достигать 400 мкДж, длительность 1 пс. Центральная частота составляет 1 ТГц [3]. Чтобы соблюсти фазовый синхронизм между генерирующим излучением и терагерцевым, использовалось оптическое выпрямление фемтосекундных импульсов с наклонным волновым фронтом в кристалле MgO:LiNbO<sub>3</sub>. Схема генератора импульсов терагерцевого излучения TERA-AX представлена на рис. 1.

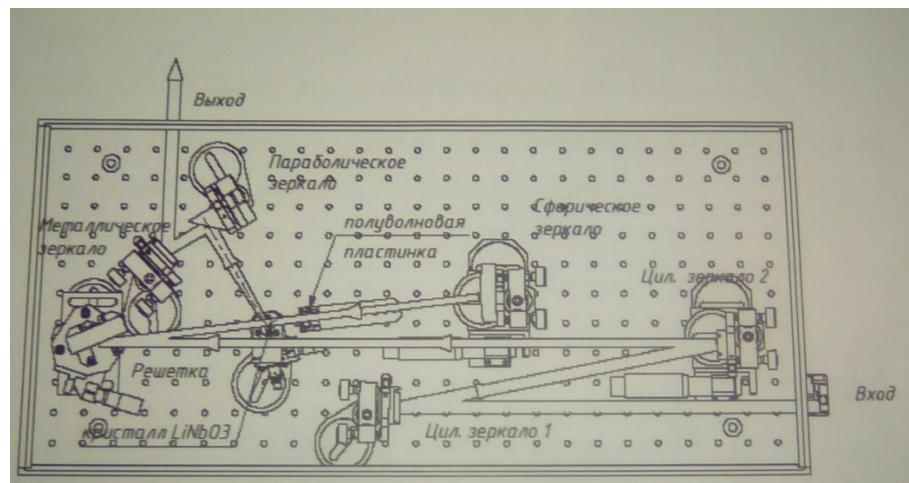


Рис. 1. Схема генератора импульсов терагерцового диапазона TERA-AX [3]

После прохождения системы TERA-AX сгенерированный терагерцовый пучок падал на плоский светоделитель, от которого частично отражался – данное излучение попадало на объект (плоское металлическое зеркало) и возвращалось обратно, проходя светоделитель и распространяясь совместно с зондирующим пучком, после чего излучение достигало кристалла теллурида цинка, выступающего в роли детектора терагерцового излучения.

Зондирующий пучок после светоделителя попадал на линию оптической задержки, способной перемещаться на 10 см с минимальным шагом 2,5 мкм, а дальше проходил сквозь полуволновую пластинку, где изменял направление своей поляризации относительно оптического стола с горизонтального на диагональное. После полуволновой пластины зондирующий пучок проходил призму Глана, которая в данной системе визуализации является поляризатором, и падал на линзу, у которой фокус совпадает с фокусом переносящей изображение объекта на кристалл детектирования линзу. Таким образом формировался коллимированный пучок зондирующего излучения, распространяющийся дальше в системе детектирования.

После кристалла излучение проходило поляризационный анализатор и достигало ПЗС-камеры. Во время юстировки установки использовалась камера Руросам III, визуализирующая интенсивность мощного терагерцового излучения.

Схема данной установки представлена на рис. 2.

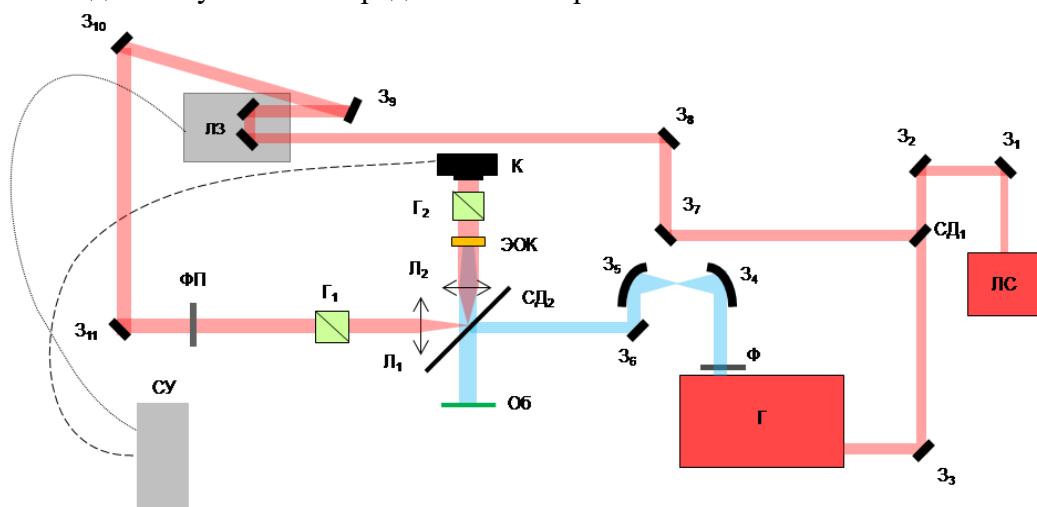


Рис. 2. Схема системы визуализации импульсного терагерцового излучения

Фотография системы визуализации импульсного терагерцового излучения представлена на рис. 3.

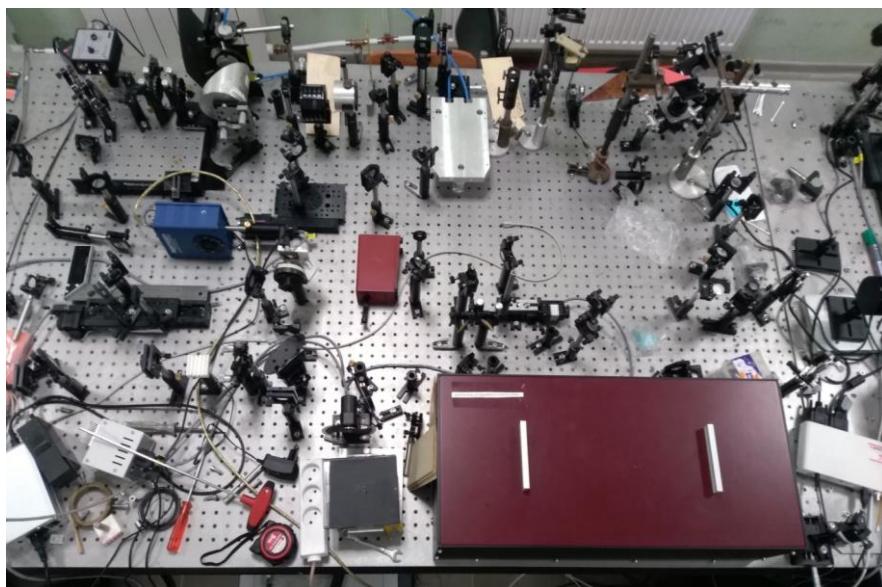


Рис. 3. Фотография системы визуализации импульсного терагерцового излучения

**Преимущества.** Главным преимуществом собранной системы визуализации является мощный источник излучения: титан-сапфировая лазерная система с регенеративным усилителем Regulus 35F1K. Энергия сгенерированных оптических импульсов достигает 2,3 мДж при длительности импульсов 35 фс и частоте следования 1 кГц. Средняя мощность ТГц излучения составила 400 мкВт. Благодаря мощному источнику можно визуализировать объекты в ТГц диапазоне с высоким значением отношения сигнал/шум более крупные, чем в менее мощных системах.

Собранный системой получения изображений в ТГц диапазоне работает в отраженном свете при нормальном падении излучения на объект. Это позволяет исследовать объекты из сильно поглощающих или непрозрачных материалов, что актуально для практических применений в биологии, медицине, а также в промышленной дефектоскопии.

Данная система позволяет быстро визуализировать объекты большого размера, что расширяет область практического применения. Потери качества изображения при этом не происходят.

**Заключение.** Во время всей работы было проведено изучение способов визуализации импульсного терагерцового излучения, и был выбран наиболее оптимальный по таким параметрам, как скорость работы и отношение сигнал/шум, метод визуализации – электрооптическое детектирование в свободном пространстве. На основе данного метода была собрана система визуализации с мощным источником фемтосекундного излучения, благодаря которому визуализация объекта с высоким отношением сигнал/шум проводилась быстрее, чем с менее мощным излучением накачки или в сканирующих изобразительных системах.

## Литература

1. Царев М.В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами: учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. – 75 с.
2. Chapter 3. THz imaging [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://urlid.ru/blwu>, своб.
3. Генератор пикосекундного излучения в диапазоне волн ТГц. Модель TERA-AX 2. Инструкция. – ООО «Авеста-Проект», 2014. – С. 3.

УДК 535.31

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ АТМОСФЕРЫ  
ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ В ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА**

Смирнов Л.В.<sup>1</sup>, Гришканич А.С.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.т.н., доцент Рыжова В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассчитаны коэффициенты пропускания атмосферы. Для расчета используется метод Эльдера–Стронга. Исследование проводится в температурном диапазоне от  $-15$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Кроме этого рассчитаны значения влажности воздуха и водности на горизонтальной и наклонной трассах.

**Ключевые слова:** коэффициент пропускания атмосферы, трасса, влажность, водность.

**Введение.** В настоящее время разработка, изучение и использование прибора способного предсказывать зарождающиеся погодные явления на определенной области, очень востребована. Поскольку большинство ураганов зарождается на морской поверхности и сформировавшись движутся по направлению к суше, то исследование слоев атмосферы в прибрежных районах несет за собой возможность контроля этих явлений [1, 2].

**Модель.** Рассмотрим случай, когда излучение происходит на длине волны 1064 нм. Выбранная длина волны находится в инфракрасной области спектра, что соответствует первой гармонике твердотельного лазера YAG-Nd. Этот твердотельный лазер был выбран, как источник оптического излучения, для решения поставленных задач по дистанционному зондированию и детектированию веществ индикаторов в прибрежных районах.

Расчет коэффициента пропускания атмосферы по методу Эльдера–Стронга [3–5] вычисляется по формуле:

$$\tau_n = t_0 - K_1 \lg(\omega \cdot 1000), \quad (1)$$

где  $t_0$  и  $K_1$  – коэффициент, зависящие от длины волны;  $\omega$  – водность, м.

На практике для расчета поглощения излучения в атмосфере используется понятие водности, т.е. количество воды, осажденной в слое единичного сечения протяженностью  $L$ :

$$\omega = \frac{L f a_{\varphi}}{\gamma \cdot 10^6}, \quad (2)$$

где  $L$  – дистанция, м;  $f$  – относительная влажность, отн. ед.;  $a_{\varphi}$  – абсолютная влажность;  $\gamma$  – удельный вес воды, г/м<sup>3</sup>.

С высотой концентрация паров воды быстро убывает и может быть вычислена:

$$a_{\varphi} = a_0 \cdot 10^{-H/K}, \quad (3)$$

где  $a_0$  – влажность на уровне моря;  $H$  – высота, м;  $K$  – коэффициент ( $K=5000$ , если высота в метрах).

**Результаты.** Выполним расчет коэффициента пропускания атмосферы на горизонтальной трассе длиной в 5000 м. Для исследования был выбран температурный диапазон от  $-15$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Результаты расчета позволяют судить об изменении коэффициента пропускания атмосферы по всему диапазону температур. Полученные данные коэффициента пропускания атмосферы, водности и влажности окружающей среды приведены в табл. 1. Рис. 1 наглядно демонстрирует зависимость коэффициента пропускания атмосферы на всем диапазоне температур.

Таблица 1. Значения влажности, водности и коэффициент пропускания при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$a, \text{г}\cdot\text{м}^3$	$\omega, \text{мм}$	$\tau, \%$
-15	1,6	6,4	92,99
-10	2,35	9,4	90,24
-5	3,41	13,64	87,57
0	4,86	19,44	85,03
5	6,32	25,28	83,15
10	9,41	37,64	80,30
20	17,32	69,28	75,92
30	30,38	121,52	71,90
40	51,1	204,4	68,17
50	82,8	331,2	64,71

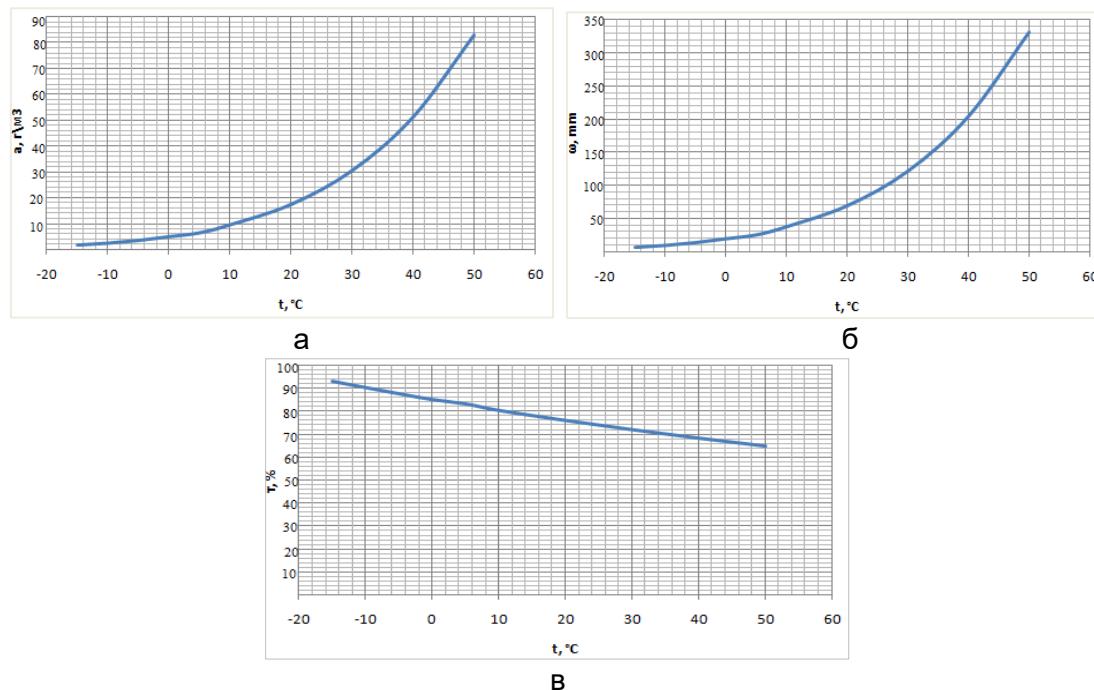


Рис. 1. Зависимость влажности воздуха (а), водности (б) и коэффициента пропускания (в) от температуры на горизонтальной трассе

Выполним расчет пропускания атмосферы на наклонной трассе в том же температурном диапазоне. Высота наклонной трассы будет уменьшаться в пределах от 5000 м до 1000 м. Это позволит судить об изменении коэффициента пропускания атмосферы на различной высоте.

Данные расчета водности и коэффициента пропускания атмосферы пропускания атмосферы представлены в табл. 2, а их зависимости на рис. 2.

Таблица 2. Значения водности и коэффициент пропускания при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	OX=5000 м; OY=5000 м		OX=5000 м; OY=4000 м		OX=5000 м; OY=3000 м	
	$\omega, \text{мм}$	$\tau, \%$	$\omega, \text{мм}$	$\tau, \%$	$\omega, \text{мм}$	$\tau, \%$
-15	3,06	98,28	3,08	98,21	14,20	87,28
-10	4,49	95,52	4,53	95,46	20,85	84,53
-5	6,52	92,85	6,58	92,79	30,26	81,86
0	9,30	90,31	9,38	90,25	43,13	79,32
5	12,09	88,43	12,20	88,37	56,09	77,44

	OX=5000 м; OY=5000 м		OX=5000 м; OY=4000 м		OX=5000 м; OY=3000 м	
$t, ^\circ\text{C}$	$\omega, \text{mm}$	$\tau, \%$	$\omega, \text{mm}$	$\tau, \%$	$\omega, \text{mm}$	$\tau, \%$
10	18,00	85,58	18,16	85,52	83,52	74,59
20	33,15	81,21	33,43	81,15	153,73	70,21
30	58,13	77,18	58,64	77,12	269,65	66,19
40	97,79	73,45	98,65	73,39	453,56	62,46
50	158,45	70,00	159,84	69,93	734,94	59,01
OX=5000 м; OY=2000 м			OX=5000 м; OY=1000 м			
$t, ^\circ\text{C}$	$\omega, \text{mm}$		$\tau, \%$		$\omega, \text{mm}$	$\tau, \%$
-15	5,51		94,071		24,341	83,42
-10	8,08		91,32		35,751	80,67
-5	11,73		88,65		51,881	78,00
0	16,72		86,11		73,941	75,46
5	21,75		84,23		96,151	73,58
10	32,37		81,38		143,161	70,72
20	59,59		77,01		263,511	66,35
30	104,53		72,98		462,20	62,33
40	175,83		69,25		777,44	58,60
50	284,90		65,79		1259,74	55,15

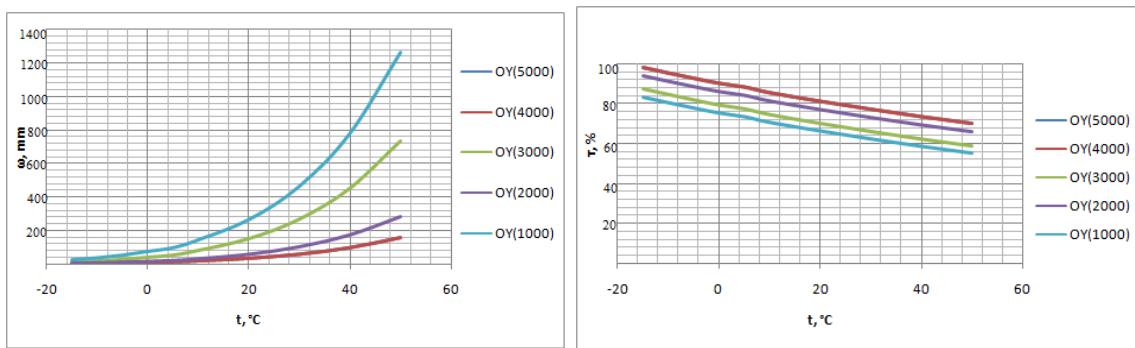


Рис. 2. Зависимости водности (а) и коэффициентов пропускания атмосферы (б) от температуры на наклонной трассе

**Заключение.** В работе проведено исследование пропускной способности атмосферы в ИК диапазоне. Проанализировав полученные результаты становится ясно, что с увеличением температуры коэффициент пропускания атмосферы уменьшается. Кроме этого, коэффициент пропускания атмосферы зависит от высоты. С увеличением высоты увеличивается и коэффициент пропускания атмосферы в прибрежных районах.

### Литература

1. Алекин О.А., Ляхин Ю.И. Химия океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 344 с.
2. Герман М.А. Спутниковая метеорология: Основы косм. методов исследования в метеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 367 с.
3. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения: учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов. – СПб.: Политехника, 1991. – 240 с.
4. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Пер. с англ. – М. Мир, 1987. – 550 с.
5. Козинцев В.И. и др. Основы количественного лазерного анализа. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2006. – 464 с.

УДК 547.995.15:620.3

**ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ  
ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТАНОВКИ  
ЭЛЕКТРОСПИННИНГА NANON-01A**

Снетков П.П.<sup>1</sup>, Хребтова В.П.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.т.н., профессор Успенская М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены принципы процесса электроформования микро- и наноструктур из растворов полимеров, приведены технические характеристики установки электроспиннинга NANON-01A (MECC CO., LTD.), а также определены параметры, ответственные за процесс электроформования и его стабильность. В настоящей работе кратко представлены результаты по получению и исследованию структуры получаемых волокон на основе гиалуроновой кислоты микро- и наноразмерного уровня.

**Ключевые слова:** биополимер, гиалуроновая кислота, диметилсульфоксид, нановолокно, прядомость, электроформование.

В настоящее время в различных сферах науки и техники находят применение полимерные микро- и наноструктуры, в том числе и нановолокна, полученные из раствора полимеров с помощью одного из следующих методов: вытягивания, электроспиннингом, магнитоспиннингом или использованием нанофильтер. Стоит отметить, что магнитоспиннинг – это новейший метод, не получивший пока широкого распространения, однако, быстро развивающийся.

Несмотря на наличие четырех основных методов получения полимерных волокон из растворов, наиболее эффективным и простым с точки зрения аппаратурного оформления методом является электроспиннинг (электроформование), в котором волокна с диаметрами микро- и нанодиапазона формуются под воздействием электростатических сил на электрически заряженную струю полимерного раствора [1].

Первый патент на метод получения волокон в электростатическом поле был выдан в 1902 г. в США [2], однако тогда он не получил практического применения.

Процесс электроформования волокон тесно связан с процессом электрогидродинамического распыления жидкостей, в котором раствор подается в дозирующую фильтру, находящуюся под высоким электрическим напряжением, и, тем самым, распыляется силами отталкивания одноименных электрических зарядов на мелкие капли (спрей) [3].

В процессе электроспиннинга образуется характерный конус Тэйлора (рис. 1).

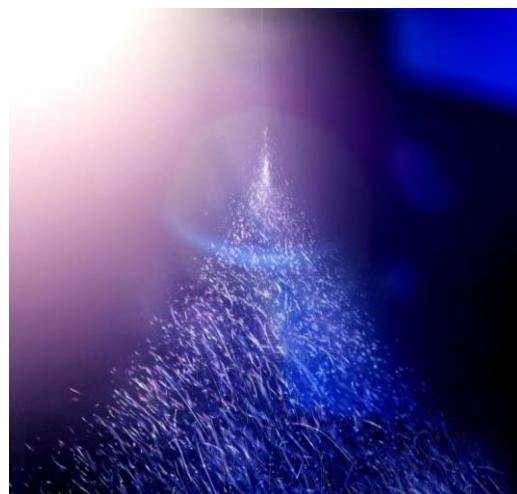


Рис. 1. Вид конуса Тэйлора

В ходе работы нами был использован для электроспиннинга прибор NANON-01A, разработанный компанией MECC CO., LTD. совместно с Технологическим Институтом Киото (Япония) и Национальным Университетом (Сингапур) – ведущими научными центрами в области исследования нановолокон. Универсальная установка NANON-01A предоставляет широкие возможности для получения нановолокон из различных полимеров в лабораторных условиях [4].

Представленная установка позволяет получать как отдельные частицы (за счет электрогидродинамического распыления), так и различные волокна (ориентированные, неориентированные, полые, коаксиальные, сверхтонкие).

Основные технологические параметры прибора NANON-01A, доступные для изменения пользователем, приведены в таблице.

Таблица. Основные технологические параметры прибора NANON-01A

Параметр электроспиннинга	Значение
Напряжение между иглой и осадительным электродом, кВ	0,5–30,0 (шаг 0,5)
Расстояние между иглой и осадительным электродом, мм	50–150
Скорость передвижения прядильного узла, мм/с	0–300
Скорость вращения осадительного электрода, об/мин:	
– барабанный коллектор;	150–3000
– коллектор с сердечником	50–500
Скорость подачи прядильного раствора (расход), мл/ч	0,1–60

Помимо указанных в таблице параметров, на процесс электроформования волокон и частиц существенно влияет тип и физико-химические параметры растворителя, молекулярная масса используемого полимера, концентрация его раствора, вязкость, электропроводность, поверхностное натяжение и т.д. Изменения хотя бы одного из перечисленных параметров может привести к изменению всего процесса в целом, а, в некоторых случаях, к его дестабилизации.

Установка электроспиннинга NANON-01A является оптимальным решением для научно-исследовательских лабораторий и позволяет оперативно получать микро- и наноструктуры из растворов полимеров. Однако, несмотря на высокую эффективность и простоту аппаратурного оформления, метод электроформования, используемый в данном приборе, накладывает некоторые ограничения на применяемые полимерные растворы, в частности, водные, по причине высокого уровня их электропроводности и низкой скорости испарения растворителя в процессе формирования и осаждения волокон/частиц.

Одним из таких «сложных» полимеров является гиалуроновая кислота (гиалуронан, гиалуронат). По структуре гиалуроновая кислота представляет собой высокомолекулярный анионный линейный гетерополисахарид, построенный из регулярно чередующихся остатков D-глюкуроновой кислоты и N-ацетил-D-глюкозамина [5].

Несмотря на то, что этот биополимер изучается с 1934 г. [6], перед исследователями и сегодня стоит острая проблема получения из него волокон и частиц микро- и наноуровня методом электроформования. Отсутствие растворимости гиалуронана в летучих органических растворителях существенно ухудшает электропрядомость раствора, что подталкивает инженеров-разработчиков использовать полимеры-модификаторы, такие как полиэтиленоксид (ПЭО) [7], поливиниловый спирт (ПВС) [8] и т.п., а также смеси растворителей, например, систему вода-диметилформамид [9]. Однако, такие добавки существенно снижают биоактивную ценность получаемого полимерного материала в целом. В некоторых исследованиях [10] в рецептуре прядильного раствора используется в качестве растворителя уксусная

кислота, что неизбежно приводит к деполимеризации гиалуроновой кислоты, и, соответственно, ее присутствие значительно влияет на сам процесс формирования волокон [11].

Цель работы – оценить степень влияния состава прядильного раствора гиалуроновой кислоты и технологических параметров процесса электроформования на морфологию и характеристики получаемых волоконных структур микро- и наноразмерного уровня.

В связи с отсутствием в научно-технической литературе конкретных рекомендаций по составу прядильных растворов биополимеров, в частности гиалуроновой кислоты, перед нами стояла задача определить оптимальные условия получения полимерных микро- и нанокомпозиций из гиалуроновой кислоты. Помимо этого, в процессе исследования необходимо было разработать рецептуры прядильных растворов без использования полимеров-модификаторов, а также без применения диметилформамида, запрещенного в клинической практике.

### Промежуточные результаты

1. Оценено влияние концентрации гиалуроновой кислоты на вид получаемых микро- и наноструктур: при низкой концентрации полимера происходит распыление и образование частичек, в то время как при повышении концентрации образуются волокна.
2. Определена максимальная концентрация гиалуроновой кислоты, при которой возможна подача раствора полимера через фильтру внутренним диаметром 0,40 мм.
3. Определены значения минимального приложенного напряжения, при котором начинается процесс формирования микро- и наноструктур. Помимо этого определен оптимальный диапазон рабочих напряжений, при которых процесс электроформования происходит наиболее стабильно.

### Основные практические результаты

1. Разработаны рецептуры растворов гиалуроновой кислоты, а также подобраны оптимальные технологические параметры для получения микро- и наночастиц на установке электроспиннинга NANON-01A.
2. Подобраны оптимальные составы прядильных растворов гиалуроновой кислоты для обеспечения стабильности процесса электроформования.
3. Методом электроспиннинга получены волокна (рис. 2) на основе гиалуронана без применения токсичного диметилформамида, без использования полимеров-носителей (ПВС и ПЭО), а также без использования органических кислот, разрушающих гиалуронан.

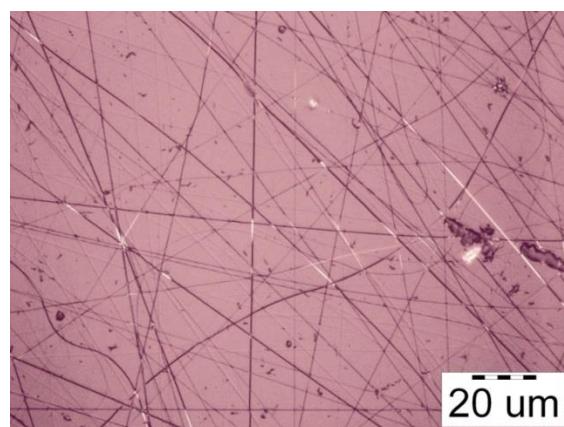


Рис. 2. Микрофотография полученных нановолокон из гиалуроновой кислоты

Таким образом, в ходе работы был создан научно-технический задел по процессу электроформования волокон и частиц из растворов гиалуроновой кислоты, что позволит в дальнейшем получить новые нетканые материалы с улучшенным комплексом эксплуатационных свойств.

### Литература

1. Матвеев А.Т., Афанасов И.М. Получение нановолокон методом электроформования: учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы» / Под ред. В.В. Авдеева, А.Ю. Алентьева, Б.И. Лазоряк, О.Н. Шорниковой. – М.: Изд-во МГУ, 2010. – 83 с.
2. Patent US 705691. Method of dispersing fluids / William James Morton. Declared 20.02.1900. Published 29.07.1902.
3. Филатов Ю.Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс) / Под редакцией проф. В.Н. Кириченко. – М.: ГНЦ РФ НИФХИ им. Л.Я. Карпова, 2001. – 231 с.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lab-test.ru/otrasli/polimerы/volokno2015-10-30-09-43-32245864906/elektrospinnig-laboratoryj/nanon-01a-1-detail#tab1> (дата обращения: 01.03.2019).
5. Радаева И.Ф., Костина Г.А., Змиевский А.В. Гиалуроновая кислота: биологическая роль, строение, синтез, выделение, очистка и применение // Прикладная биохимия и микробиология. – 1997. – Т. 33. – № 2. – С. 133–137.
6. Meyer K., Palmer J.W. The polysaccharide of the vitreous humor // Journal of Biological Chemistry. – 1934. – V. 107. – № 3. – P. 629–634.
7. Ahire J.J. et al. Polyethylene oxide (PEO)-hyaluronic acid (HA) nanofibers with kanamycin inhibits the growth of *Listeria monocytogenes* // Biomedicine & Pharmacotherapy. – 2017. – V. 86. – P. 143–148.
8. Chanda A. et al. Electrospun chitosan/polycaprolactone-hyaluronic acid bilayered scaffold for potential wound healing applications // International journal of biological macromolecules. – 2018. – V. 116. – P. 774–785.
9. Necas J. et al. Hyaluronic acid (hyaluronan): a review // Veterinarni medicina. – 2008. – V. 53. – № 8. – P. 397–411.
10. Chen G. et al. Preparation, characterization, and application of PEO/HA core shell nanofibers based on electric field induced phase separation during electrospinning // Polymer. – 2016. – V. 83. – P. 12–19.
11. Хабаров В.Н., Бойков П.Я., Селянин М.А. Гиалуроновая кислота: получение, свойства, применение в биологии и медицине. – М.: Практическая медицина, 2012. – 224 с.

УДК 535.417, 535.317, 778.38

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПЛОСКОСТИ  
ОБЪЕКТОВ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО  
С ПОМОЩЬЮ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ**Старовойтов С.О.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Корешев С.Н.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе приведены результаты исследования влияния двух методов модификации фазового распределения в плоскости объектов на изображение, восстанавливаемое с помощью синтезированных голограмм. Работа выполнена методом математического моделирования реальных физических процессов синтеза и восстановления голограмм бинарных транспарантов.

**Ключевые слова:** голограмма, синтезированная голограмма, восстановление голограммы, фазовая коррекция, эффект близости, опорная волна.

**Введение.** Синтезированные с помощью компьютера голограммы имеют ряд особенностей по сравнению с традиционными голограммами. В частности, для их изготовления используются не реально существующие объекты, а их математические модели, и сам процесс записи производится в виртуальном пространстве. По этой причине при применении синтезированных голограмм появляется ряд возможностей по манипуляции формой представления объекта, с целью повышения качества восстанавливаемого изображения. В качестве примеров можно привести работу [1], в которой предлагается вариант частичного устранения влияния интермодуляционной помехи на качество изображения с помощью изменения изображающих свойств голограммы. В работе [2] предлагается метод увеличения глубины резкости в восстановленном изображении синтезированных голограмм, основанный на представлении объектной волны в виде суперпозиции нескольких волн от одинаковых объектов, расположенных на различных расстояниях от плоскости синтеза голограммы. В данном исследовании рассматривались методы снижения шумов и повышения качества в изображениях, восстановленных с помощью синтезированных голограмм, основанные на модификации фазового распределения на объекте и голограмме в процессе ее синтеза. Первый из них связан с компенсацией широко известного в традиционной фотолитографии эффекта близости, возникающего при малых размерах элементов объекта. Второй – с выбором угла падения опорной волны, который бы обеспечил регистрацию восстановленного изображения объекта в максимальном качестве.

**Модель.** Предлагаемый метод фазовой коррекции эффекта близости аналогичен методу, который применяется в традиционной оптической фотолитографии: повышение разрешающей способности осуществляется за счет минимизации влияния вторичных дифракционных максимумов на качество восстановленного изображения объекта – бинарного транспаранта. Для этого в пространстве предметов используются фазовые маски, которые обеспечивают противофазность излучения, формирующего изображения соседних элементов структуры фотошаблона. При суперпозиции этих находящихся в противофазе волн в области между изображениями соответствующих элементов происходит деструктивная интерференция вторичных дифракционных максимумов, которая и повышает разрешающую способность системы. Поскольку синтез цифровых голограмм проводится в виртуальном пространстве, для применения метода коррекции эффекта близости в рассматриваемом случае не требуется использование физических фазовых масок. По сути, процесс сводится к коррекции математической модели фотошаблона, т.е. введению необходимой фазовой модуляции в его функцию пропускания.

В работе [3] проведен частотный анализ изображающих свойств синтезированных голограмм, и изложен ряд требований к параметрам синтеза голограмм, выполнение которых позволяет обеспечить разделение дифракционных порядков в процессе восстановления изображения. В частности, была представлена зависимость оптимального угла падения опорной волны от ее длины и размера пикселя на голограмме:

$$\sin(\theta) = \frac{1,5\lambda}{4d_d}, \quad (1)$$

где  $d_d$  – размер пикселя голограммы;  $\lambda$  – длина волны.

Следует учесть, что анализ проводился для случая точечного объекта, и для более сложных объектов значение угла может быть иным из-за различия в их спектрах. В рамках данной работы были проведены эксперименты для поиска зависимости качества восстановленного изображения от значения угла падения опорной волны для объектов различной структуры и сделаны общие выводы.

Исследование о влиянии модификации фазового распределения на объекте и голограмме в процессе ее синтеза на качество восстанавливаемого изображения проводились помошью специализированного комплекса синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов Френеля. Эксперименты выполнялись при следующих параметрах схемы синтеза и восстановления голограмм: размер пикселей объекта  $20 \times 20 \text{ нм}^2$  для всех случаев, в которых иной размер не оговорен особо, размер плоскости голограммы  $440 \times 440$  пикселей  $20 \times 20 \text{ нм}^2$ , рабочая длина волны –  $13,5 \text{ нм}$ , угол падения параллельного опорного пучка  $14,7^\circ$ , расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы –  $20,4 \text{ мкм}$ .

**Результаты.** В первую очередь необходимо установить границы применимости метода компенсации эффекта близости, т.е. расстояния, при которых элементы структуры фотошаблона могут считаться соседними и эффект оказывает влияние на качество восстанавливаемого изображения. Исследование влияния расстояния между элементами структуры объекта на эффективность метода коррекции эффекта близости проводилось методом математического моделирования в процессе синтеза и цифрового восстановления голограмм трех щелей размером  $4 \times 40$  пикселей, т.е.  $80 \times 800 \text{ нм}$  каждая. Расстояния между щелями в экспериментах были меньше ширины щели и составляли от 2 до 4 пикселей, т.е. от  $40$  до  $80 \text{ нм}$ . В каждом из двух рассматриваемых случаев синтезировалось две голограммы – для случая, когда падающее на щели излучение синфазно и для случая, когда оно в противофазе. Таким образом, в виртуальном пространстве были синтезированы шесть голограмм и восстановлены соответствующие изображения, представленные на рис. 1.

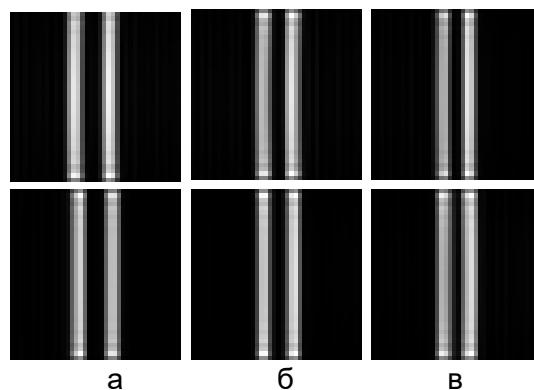


Рис. 1. Восстановленные изображения для случаев, когда излучение от щелей синхронизировано (верхний ряд) и когда оно находится в противофазе (нижний ряд) при расстояниях между щелями, равных  $80 \text{ нм}$  (а);  $60 \text{ нм}$  (б) и  $40 \text{ нм}$  (в)

Можно заметить, что даже при расстоянии между щелями, составляющими объект, равном двум пикселям, т.е. 40 нм, разница в качестве восстановленного изображения, выражаемая количественно через критерий качества, для случаев синтеза при синфазном и противофазном освещении щелей невелика. Критерий качества восстановленного изображения определялся через число градаций при пороговой обработке этого изображения, при котором распределение интенсивности на нем идентично распределению интенсивности на исходном фотошаблоне. Так, изображения, восстановленные с помощью голограмм, записанных при синфазном излучении, соответствовали исходным объектам на протяжении 25 градаций пороговой обработки при расстоянии между щелями 80 нм, 39 градаций при 60 нм и 23 градаций – при 40 нм. При противофазном излучении изображение соответствовало исходному объекту на протяжении 44 градаций при расстоянии между щелями 80 нм, 30 – при 60 нм и 20 градаций – при 40 нм.

Рассмотрим объект аналогичной конфигурации – транспарант с двумя параллельными щелями, но с минимально возможным расстоянием между его элементами в один пиксель, т.е. 20 нм. На рис. 2 представлены восстановленные изображения такого объекта для случая синфазности и противофазности излучения, освещавшего щели, а также, для удобства визуальной оценки уровня помех, на рис. 3 показаны распределения интенсивности на этих изображениях в зависимости от горизонтальной координаты. Заметно, что при синфазности восстановленного изображения щелей частично сливаются.

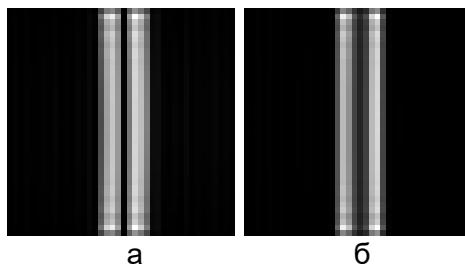


Рис. 2. Восстановленные изображения транспарантов с параллельными щелями размером  $80 \times 800$  нм с расстоянием 20 нм между ними в случае использования метода фазовой коррекции эффекта близости (а) и без применения метода (б)

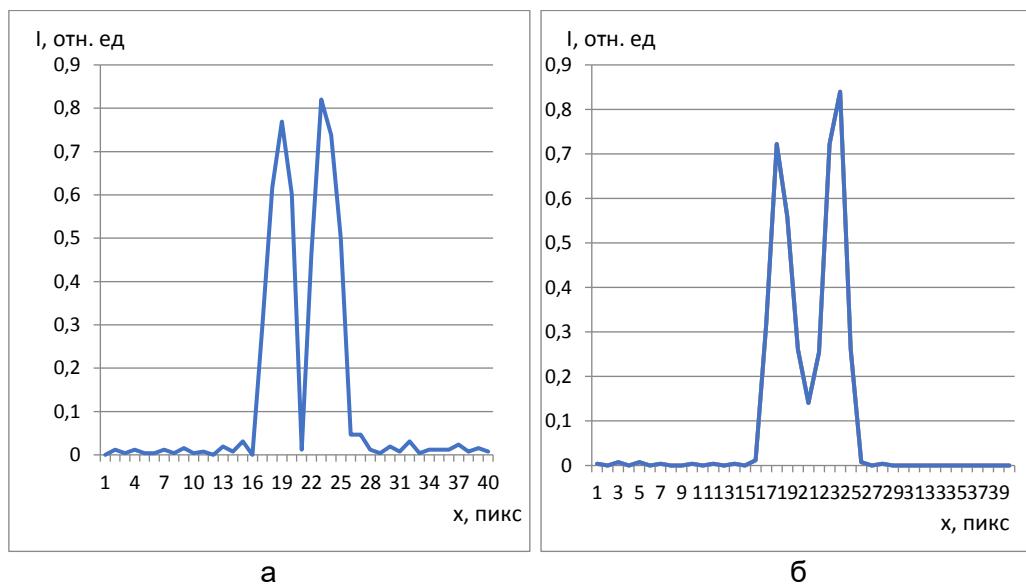


Рис. 3. Распределения интенсивности на восстановленных изображениях транспарантов с параллельными щелями размером  $80 \times 800$  нм с расстоянием 20 нм между ними в случае использования метода фазовой коррекции эффекта близости (а) и без его применения (б)

При проведении синтеза голограммы без использования метода фазовой коррекции эффекта близости восстановленное изображение не проходит пороговую обработку и визуально воспринимается как изображение одной щели, в то время как при освещении щелей в противофазе его критерий качества достигает приемлемого значения, а восстановленного изображение однозначно идентифицируется как две близкорасположенные одинаковые щели. Сравнение графиков распределения интенсивности позволяет сделать вывод о том, что именно подавление шумов в пространстве между изображениями обеих щелей позволяет добиться увеличения качества во втором случае.

Теперь оценим влияние метода фазовой коррекции эффекта близости в близкорасположенных объектах на качество восстановленного изображения для пар щелей большей ширины. Для этого были синтезированы и восстановлены голограммы объектов-транспарантов в виде пары параллельно расположенных щелей размером  $5 \times 40$ ,  $6 \times 40$ ,  $7 \times 40$ ,  $8 \times 40$  пикселей при расстоянии между щелями в 20 нм, т.е. один пиксель, которые показаны на рис. 4. Каждый объект, как и в экспериментах выше, рассматривался в двух вариантах: при синфазности излучения, падающего на щели, и при его противофазности.

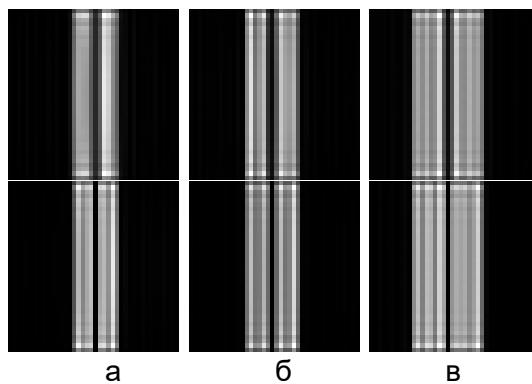


Рис. 4. Восстановленные изображения в случае, когда излучение от щелей синхронизировано (верхний ряд) и когда оно находится в противофазе (нижний ряд) при ширине щелей, равной 100 нм (а); 120 нм (б); 160 нм (в)

Такие более широкие щели разрешаются и без применения метода фазовой коррекции эффекта близости, однако использования излучения в противофазе в процессе синтеза голограмм позволяет дополнительно повысить качество получаемого изображения, что отражается в повышении численного значения применяемого критерия качества для всех четырех рассмотренных объектов. В частности, изображения, восстановленные с помощью голограмм, записанных при синфазном излучении, соответствовали исходным объектам на протяжении 11 градаций при ширине щелей 100 нм; 16 градаций – при ширине щелей 120 нм и 41 градаций – при 160 нм. Применение фазовых масок позволило увеличить разрешение – в частности, щели шириной 100 нм восстанавливались без ошибок на протяжении 52 градаций. Для щелей шириной 120 нм диапазон составлял уже 66 градаций, а для 160 нм – 59 градаций. Как и в ранее проведенных экспериментах, увеличение разрешающей способности происходит в первую очередь из-за снижения интенсивности шумов в пространстве между соседними элементами объекта, т.е. между щелями.

Далее был рассмотрен второй из предлагаемых фазовых методов повышения качества восстановленного изображения – выбор корректного угла опорной волны, который обеспечил бы разделение порядков дифракции в полученном изображении для минимизации шумов в нем. Для этого в ранее упомянутом программном комплексе были синтезированы и восстановлены голограммы объектов-транспарантов в виде пары параллельно расположенных щелей размером  $2 \times 40$ ,  $4 \times 40$ ,  $6 \times 40$ ,  $8 \times 40$  пикселей

при расстоянии между щелями в 20 нм, т.е. один пиксель, а также объекта «Уголки», представляющий собой крест толщиной в один пиксель и уголки толщиной от одного пикселя до трех пикселей, который представлен на рис. 5.



Рис. 5. Объект «Уголки»

Для каждого из исследованных объектов был синтезирован ряд голограмм, отличающихся использованным углом падения плоской опорной волны. Рассматривались углы в интервале от  $10^\circ$  до  $30^\circ$  с шагом в полградуса. Далее была проведена количественная оценка качества восстановленного изображения с помощью критерия, который, как и в предыдущем исследовании, выражался через число градаций при пороговой обработке полученного изображения, при котором распределение интенсивности на нем идентично распределению интенсивности на исходном объекте. На рис. 6 представлены некоторые из полученных графиков зависимости качества восстанавливаемого изображения от угла падения опорной волны в процессе синтеза голограммы.

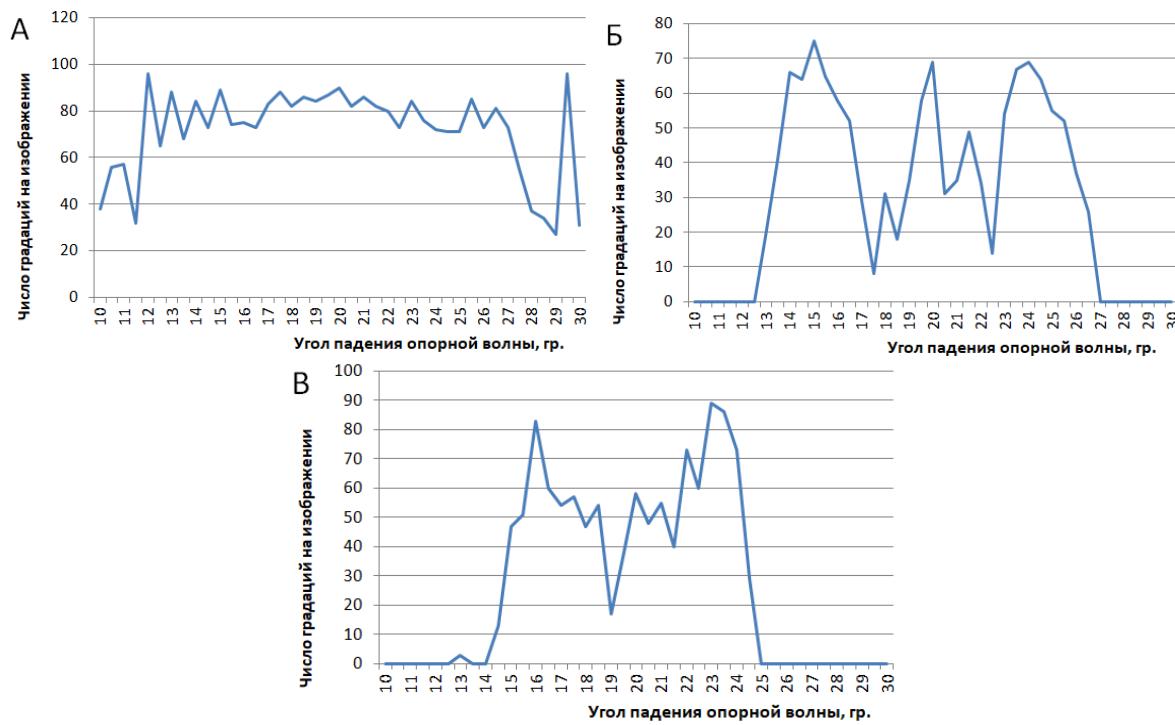


Рис. 6. Зависимость числа градаций при пороговой обработке от угла падения опорной волны для объектов «Щели 2x40» (А), «Щели 8x40» (Б) и «Уголки» (В)

Заметно, что с увеличением сложности структуры объекта ширина интервала значений углов, при котором качество восстановленного изображения можно считать удовлетворительным, снижается. Использование значения угла в  $14,7^\circ$  градусов, полученное исходя из частотного анализа голограммического поля при рассмотрении точечного объекта, не является оптимальным при работе с фотошаблонами с другой

структурой. Таким образом, для обеспечения наилучшего качества восстановленного изображения в реальном процессе голографической фотолитографии, необходимо сначала провести предварительный синтез множества голограмм при разных значениях угла падения опорной волны для выбора угла, оптимального для транспаранта с соответствующей структурой.

**Заключение.** В работе было показано, что в целом эффект близости возникает только при малых расстояниях между щелями. Это позволяет использовать изображения, восстановленные с помощью синтезированных голограмм для большинства практических задач, а в случае необходимости провести фазовую коррекцию эффекта близости, эффективность которого продемонстрирована с помощью математического моделирования процессов синтеза и восстановления двумерных голограмм-проекторов Френеля. Значительного улучшения качества восстанавливаемого изображения можно добиться при условии правильного выбора значения угла падения опорной волны, который осуществляется по результатам предварительного моделирования записи голограммы при разных параметрах схемы.

### Литература

1. Zhang Y., Lü Q., Ge B. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography // Optics communications. – 2004. – V. 240. – № 4-6. – P. 261–267.
2. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Фролова М.А. Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм // Оптический журнал. – 2018. – Т. 85. – № 11. – С. 50–57.
3. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С. Изображающие свойства дискретных голограмм. I. Влияние дискретности голограмм на восстановленное изображение // Оптический журнал. – 2014. – Т. 81. – № 3. – С. 14–19.

УДК 535.21, 75.04, 7.025.4

**ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПРЕДМЕТОВ СТАНКОВОЙ ЖИВОПИСИ  
С ПОМОЩЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА БЛИЖНЕГО  
ИК-ДИАПАЗОНА**

Струсевич А.В.<sup>1</sup>, Вейко В.П.<sup>1</sup>, Сирро С.В.<sup>2</sup>

Научный руководитель – д.т.н., профессор Вейко В.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО; <sup>2</sup>Государственный Русский музей

В работе рассмотрена возможность лазерной очистки образцов, имитирующих слои реального произведения станковой живописи, от поверхностных загрязнений и нежелательных слоев лакового покрытия альтернативными источниками лазерного излучения ближнего ИК-диапазона, позволяющими решить ряд проблем, связанных с лазерной очисткой станковой живописи.

**Ключевые слова:** станковая живопись, иконы, лазерная очистка, волоконный лазер, тулиевый лазер, абляция, методы реставрации.

На сегодняшний день предметы станковой живописи представляют особую ценность для музеиных фондов и культурной составляющей государства, так как передают через изображения разных эпох быт и культуру людей прошлых лет. Отдельно выделяют такой вид живописи, как иконопись. В Древней Руси иконопись являлась основным видом изобразительного искусства с конца X века и до начала XVIII века, пока не была вытеснена светскими видами живописи, пришедшими из европейских стран. Такой долгий период развития иконописи на Руси выделил русскую иконопись как отдельную ветвь в изобразительном искусстве. И как результат этого – множество памятников культуры Древней Руси и государства Российского в виде икон сохранилось и по сей день, что делает проблемы сохранения икон актуальными для нашей страны, как церковного государства с древней историей.

Совокупность неблагоприятных условий хранения в прошлые века приводила не только к разрушению основы, грунта или красочного слоя, но и загрязнению поверхности икон, в том числе органическими компонентами животного происхождения, свечной копотью и сажей. Кроме того, поверхностный слой олифы, предназначенный для защиты красочного слоя от внешнего воздействия, со временем меняет свои оптические свойства и приобретает темный оттенок, что искажает восприятие оригинальных цветов произведения и требует дополнительных мер очистки.

Традиционно поверхностные загрязнения и состарившийся лак удаляют с помощью различных органических растворителей (спирты, подсолнечное масло, вода, и др.) Недостатком этого метода является, во-первых, опасность проникновения растворителя в глубину красочного слоя и частичное повреждение живописи при удалении набухшего лака. Во-вторых, невозможность количественного удаления растворителя из картины, так как он остается в живописи в течение длительного времени. Кроме того, данный метод является опасным при реставрации картин и икон с деструктированным грунтом и красочным слоем, плохо связанным с грунтом.

Использование современного оптического оборудования и микроприборов сделало процесс традиционной химической и механической очистки относительно безопасным, но данный современный метод не способен полноценно решить ряд проблем (рис. 1).

Так, например, кракелюры на поверхности картин усложняют процесс контроля при традиционном методе очистки и могут способствовать проникновению растворителя в красочный или грунтовый слой, что может привести к необратимым последствиям и даже порче станкового произведения. Также, ряд органических лаков и поверхностных загрязнений, таких как сажа и копоть, плохо растворяются даже

самыми сильными растворителями, что делает метод традиционный очистки, даже с использованием современных технологий, неэффективным.



Рис. 1. Проблемы традиционных методов очистки станковой живописи [1]

Сегодня из-за неправильного хранения и неблагоприятных условий, которым могли подвергаться иконы (например, пожарам), они находятся в непригодном для музеиного экспоната виде и требуют серьезных реставрационных мер. Что является сложной задачей, поскольку каждая картина или икона была создана при помощи веществ разнообразного химического состава, и методы реставрации зачастую не являются универсальными. Поэтому реставраторы продолжают более глубоко исследовать и совершенствовать традиционные методы реставрации и искать альтернативные методы, которые смогли бы решить определенные задачи реставрационной деятельности, например, такие, как лазерные методы очистки.

Лазерные методы очистки предметов искусства активно исследуются в странах Европы и Америки. В настоящее время наиболее отработана технология лазерной очистки камня (мрамора, песчаника, известняка, гранита и др.) [2]. Известно также много удачных примеров использования лазера для реставрации произведений живописи (картины, икон и фресок) [3], предметов из органических материалов (дерева, кости, бумаги, кожи, ткани, пергамента) [4], стекла и керамики [5].

Лазерная технология имеет большой потенциал в развитии более безопасных методов в сравнении с традиционными методами очистки из-за ее управляемости и воспроизводимости. В целом, каждый лазер эффективен, избирателен и безопасен при использовании в определенных режимах работы. Однако для станковой живописи лазерная очистка является одним из наиболее деликатных методов и требует тщательного изучения теплового, фотохимического и фотомеханического воздействия, вызываемого лазером, во избежание повреждения красочного слоя. Успешные исследования европейских и американских ученых в данной области показывают целесообразность применения лазерной очистки в отдельных случаях, когда традиционные методы не способны привести к желаемому результату. Например, очистка при помощи лазера отличается своей локальностью, а современные лазерные системы способны производить очистку в сравнительно короткие сроки, что является проблематичным для традиционных методов, поскольку размеры полотен могут достигать нескольких метров в длину, которые реставраторы обрабатывают вручную при помощи микроинструментов. Совокупность всех подобных факторов открывает новые возможности лазерным технологиям в сфере реставрации и очистки. Однако в нашей стране подобные исследования практически не проводятся, что делает эту

область реставрации предметов искусства крайне актуальной и необходимой для развития и совершенствования в нашей стране реставрационного процесса в целом.

Широкое применение в области реставрации в западных странах нашла лазерная очистка эксимерными ArF и KrF лазерами, излучающими в УФ-диапазоне. Но несмотря на успешные результаты очистки [1, 6] исследователи обнаружили, что УФ-излучение пагубно влияет не только на красочный слой, вызывая его обесцвечивание, но и на слой покровного лака, который является по своей природе полимером. УФ-излучение может вызывать в нем фотохимические реакции, которые способны спровоцировать долгосрочные модификации (химические и оптические) не только в слое лака, но и в красочном слое, что в дальнейшем может привести к порче объекта искусства [7]. Кроме того, эксимерные лазеры являются довольно дорогим оборудованием и требуют специальных условий эксплуатации. Поэтому исследования лазерной очистки станковой живописи в УФ-диапазоне в настоящее время все более заменяются исследованиями с использованием альтернативного и более доступного лазерного оборудования.

Такие лазеры как Nd:YAG и эрбиевый лазер в настоящее время приобретают свою значимость в области очистки картин [8–10]. Они работают в ближнем ИК-диапазоне, что менее пагубно влияет на красочный слой в сравнении с излучением УФ-диапазона, но также имеют ряд недостатков и проблем, которые ограничивают их широкое применение в области лазерной очистки станковой живописи. Например, эрбиевый лазер имеет достаточно высокое значение длительности импульса (порядка 100 мкм), что также может пагубно влиять на процесс очистки в целом.

В данной работе предлагается исследовать процесс лазерной очистки образцов, имитирующих слои реального станкового произведения (рис. 2), при помощи сканирующей системы на базе МиниМаркер, работающей в ближнем ИК-диапазоне.



Рис. 2. Образцы, подготовленные совместно с Государственным Русским музеем, имитирующие различные вариации слоев станкового произведения

Образцы подготовлены так, чтобы позволить исследовать воздействие лазерного излучения на различные слои: на сам пигмент, на покровный лак, на поверхностные загрязнения. Такой слой, как лессировочный лак представляет сегодня особый интерес для реставраторов, поскольку служит вспомогательным для пигментов слоем, который в процессе реставрации необходимо сохранить. На данном этапе процесса реставрации совершается множество ошибок, в результате которых лессировочный слой повреждается, и объект искусства теряет свою авторскую патину. Поэтому одной из задач представленного исследования является исследование воздействия лазерного излучения на слой лессировочного лака.

На рис. 3 представлена лазерная установка МиниМаркер. Сканирующая система позволяет обрабатывать область 10×10 см, при необходимости область сканирования может быть увеличена.

В систему может быть встроен модуль с иттербийевым лазером, который работает на длине волны 1064 нм, и модуль, включающий тулиевый лазер с длиной волны 2000 нм.



Рис. 3. Лазерная сканаторная система МиниМаркер

Таким образом, предлагается использовать альтернативное известным лазерным системам оборудование, которое позволяет решить такую проблему, как высокое значение длительности импульса, так как система МиниМаркер работает в наносекундном диапазоне (1–200 нс). Кроме того, талиевый лазер работает по принципу эрбииевого лазера (излучение поглощается OH-группами) и находит применение в биомедицине и обработке органических материалов, что делает его достойным конкурентом эрбииевому лазеру и потенциальным решением ряда проблем, связанных с лазерной очисткой произведений станковой живописи.

### Литература

1. Theodorakopoulos C., Zafiropoulos V. Laser cleaning applications for religious objects // European Journal of Science and Theology. – 2005. – V. 1. – P. 63–76.
2. Scheerer S., Abraham M., Madden O. Study of the effects of laser radiation on epoxy resins and epoxy systems on stone, ceramic, and glass surfaces // Journal of Cultural Heritage. – 2003. – V. 4. – P. 223–229.
3. Bordalo R. et al. Laser cleaning of easel paintings: An overview // Laser Chemistry. – 2006. – V. 2006. – 9 p.
4. Landucci F. et al. Toward an optimised laser cleaning procedure to treat important palaeontological specimens // Journal of Cultural Heritage. – 2003. – V. 4. – P. 106–110.
5. Siano S. et al. Laser cleaning methodology for the preservation of the Porta del Paradiso by Lorenzo Ghiberti // Journal of Cultural Heritage. – 2003. – V. 4. – P. 140–146.
6. Fotakis C., Anglos D., Zafiropoulos V., Georgiou S., Tornari V. Lasers in the Preservation of Cultural Heritage. Principles and Applications. – New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2007. – 366 p.
7. Oujja M. et al. UV laser removal of varnish on tempera paints with nanosecond and femtosecond pulses // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2011. – V. 13. – № 10. – P. 4625–4631.
8. DeCruz A., Izatt J.A., Nankivil D. On the use of OCT to examine the varnish layer of paintings cleaned with an Er: YAG laser // 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS). – 2016. – P. 1–6.
9. Pereira-Pardo L., Korenberg C. The use of erbium lasers for the conservation of cultural heritage. A review // Journal of Cultural Heritage. – 2018. – V. 31. – P. 236–247.
10. Antonopoulou-Athera N. et al. Laser cleaning treatment of burnt paintings // 18th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications. – International Society for Optics and Photonics, 2015. – V. 9447. – P. 944712.

УДК 621.375.826; 616.596-002.828

АКТИВНАЯ Er:YLF-ЛАЗЕРНАЯ ДОСТАВКА ЛЕКАРСТВ  
В ФОРМЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГЕЛЕЙТавалинская А.Д.<sup>1</sup>, Смирнов С.Н.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Беликов А.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В условиях *in vitro* изучена активная Er:YLF-лазерная доставка под ногтевую пластину метиленового синего первоначально размещенного на поверхности ногтя в форме 0,25% водного раствора (жидкости) или в форме геля. Обсуждается влияние толщины слоя нанесенного на ногтевую пластину препарата на количество лазерных импульсов, необходимых для инициализации процесса доставки метиленового синего, и на скорость его доставки. Было обнаружено, что наиболее эффективно активная доставка осуществляется при воздействии на 100 мкм слой препарата в форме жидкости импульсами Er:YLF-лазера с энергией 4 мДж, при этом максимальная скорость доставки метиленового синего достигает 0,29 мг/имп.

**Ключевые слова:** лазер, лазерное излучение, доставка лекарств, гидродинамические эффекты, лечение онихомикоза.

**Введение.** Ногтевая пластина является барьером для большинства местных лекарственных препаратов, в том числе и фотодинамических агентов – фотосенсибилизаторов. Многие фотосенсибилизаторы, как правило, имеют слишком большой молекулярный размер и не проникают через ногтевую пластину [1]. В настоящее время лечение онихомикоза (грибковое поражение ногтя) с помощью местных препаратов, в том числе фотодинамических, малоэффективно, так как низкая проницаемость ногтевой пластины ограничивает доставку терапевтически достаточного количества препарата к очагу поражения. Проницаемость ногтевой пластины может быть увеличена с помощью химических (кислоты, спирты, гликоли и др.), физических (микроперфорация, ионофорез, сонофорез, электропорация; ультразвуковая и лазерная доставка препаратов) и механических (инъекции, удаление или механическая перфорация ногтевой пластины) методов [1–3].

Одним из перспективных методов является доставка местных препаратов через массив микроканалов. Доставка лекарств через микроперфорированную ногтевую пластину к пораженному инфекцией ногтевому ложу может быть пассивной или активной, т.е. происходить без или в результате какого-либо внешнего воздействия. При пассивной доставке препараты на водной основе не проникают к ногтевому ложу из-за высокого коэффициента поверхностного натяжения, а препараты на спиртовой основе проникают крайне медленно.

Установлено, что активная лазерная доставка за счет лазерно-индуцируемых гидродинамических эффектов существенно увеличивает скорость проникновения лекарственных средств в биоткани [4]. Воздействие импульсным излучением лазеров ближнего и среднего ИК диапазона способно инициировать гидродинамические эффекты в жидкостях. Экспериментальные исследования показали, что облучение воды импульсами Er:YAG-, Er:YSGG-, Ho:YAG- и Yb,Er:Glass-лазеров, длины волн которых лежат вблизи ее интенсивных полос поглощения, может стимулировать возникновение в воде термоупругих волн и кавитационных процессов, сопровождающихся генерацией перепадов давления. В работе [4] был предложен и исследован метод быстрой доставки твердых микрочастиц, наночастиц и жидкостей в ткани через множественные микроканалы, созданные в результате Er:YAG-лазерной фракционной микроабляции, в том числе показано, что активная доставка ZrO<sub>2</sub> частиц в микроканалы, индуцированная гидродинамическими ударными волнами, генерируемыми импульсами Er:YAG-лазера, осуществляется с очень высокой скоростью.

Поиск новых путей активной лазерной доставки лекарств для лечения онихомикоза, стимулировал авторов настоящей работы к изучению активной доставки фотодинамического препарата (метиленового синего) к ногтевому ложу через одиночное микроотверстие, созданное в ногтевой пластине импульсами Er:YLF-лазера, в результате возбуждения в препарате гидродинамических процессов излучением того же лазера.

В исследовании в качестве препарата использован 0,25% раствор метиленового синего и оригинальный гель на основе агар-агара, содержащий кластеры метиленового синего. Метиленовый синий (МС) является широко используемым фотосенсибилизатором для фотодинамической терапии грибковых заболеваний, не токсичен и не имеет побочных эффектов [3, 5].

Целью исследования является определение возможности активной лазерной доставки метиленового синего (препарата) в форме 0,25% водного раствора и в форме геля, содержащего жидкие кластеры препарата, определение количества импульсов, необходимых для активной лазерной доставки препарата, и скорости активной доставки при использовании излучения Er:YLF-лазера.

**Материалы и методы.** В качестве образцов для исследования использовались фрагменты здоровых ногтевых пластин 10-ти добровольцев в возрасте 20–45 лет (5-х мужчин и 5-ти женщин). Фрагменты получались в результате механического удаления свободного края ногтя по мере его нормального роста. Образцы после экстракции хранились при комнатной температуре в сухом, темном месте не более одной недели. Всего в исследовании использовано 150 образцов. Средняя толщина образцов составляла  $365 \pm 10$  мкм.

В исследовании для формирования сквозного микроканала с диаметром  $300 \pm 10$  мкм использовалось излучение Er:YLF-лазера ( $\lambda=2,81$  мкм) с энергией  $E=4,0 \pm 0,1$  мДж, при которой микроперфорация ногтевой пластины происходила с наибольшей для этого лазера эффективностью. Лазерное излучение во всех экспериментах фокусировалось на поверхность ногтевой пластины, размер пятна в фокальной плоскости составлял  $220 \pm 15$  мкм. Микроотверстие в ногтевой пластине создавалось через слой препарата с толщиной 0,1–0,8 мм. Для активной доставки препарата использовалось излучение Er:YLF-лазера с параметрами, идентичными используемым для микроперфорации ногтевой пластины. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

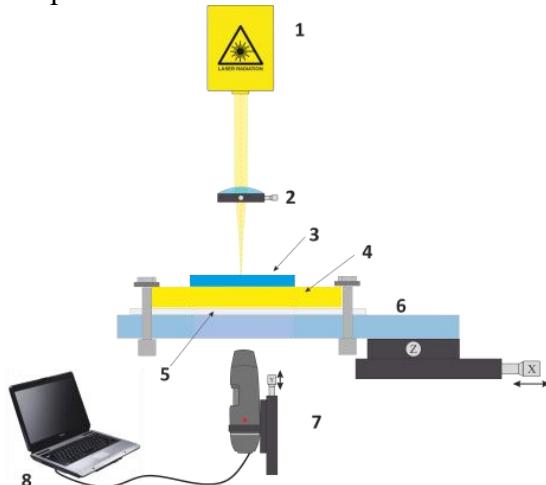


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – Er:YLF-лазер; 2 – собирающая линза  $F=50$  мм, 3 – слой метиленового синего (в форме жидкости или геля); 4 – образец ногтевой пластины; 5 – бумажная подложка; 6 – стеклянная пластина, 7 – цифровой USB-микроскоп «Prima Expert» (ОАО «ЛОМО», Россия); 8 – компьютер

В качестве препарата использовался 0,25% водный раствор метиленового синего (жидкость) или гель на основе агар-агара (концентрация агар-агара в геле  $C_{aa}=2\%$ ), содержащий жидкие кластеры метиленового синего. При использовании гелевой формы требовалось внешнее механическое воздействие (давление) для вскрытия кластеров с метиленовым синим, в экспериментах оно составляло  $P=1,3$  кПа. Для визуализации проникновения лекарственного препарата под образец помещалась бумага с плотностью 80 г/м и толщиной 100 мкм. Окрашивание бумаги свидетельствовало о проникновении препарата через микроотверстие в ногтевой пластине. Толщина слоя препарата  $h$  контролировалась оптическим методом, при этом анализировались фотографии ногтевой пластины без и со слоем препарата.

Масса проникшего под ногтевую пластину с одиночным микроотверстием метиленового синего ( $PM$ ) определялась в результате взвешивания фрагмента бумаги до и после «инициализации» доставки лекарства. Доза проникшего под ногтевую пластину препарата ( $D_{MC}$ ) определялась как отношение массы проникшего при «инициализации» лекарства к площади одиночного микроотверстия в ногтевой пластине. Скорость доставки МС через одиночное микроотверстие ( $V_{MC}$ ) определялась как отношение массы  $PM$  к количеству импульсов ( $N$ ) необходимому для активной доставки метиленового синего.

**Результаты.** На рис. 2, а представлена зависимость количества импульсов Er:YLF-лазера, необходимого для перфорации слоя жидкости или геля, перфорации ногтевой пластины и «инициализации» доставки МС ( $N$ ), от толщины нанесенного на ногтевую пластину слоя препарата ( $h$ ). Увеличение толщины слоя препарата как в форме жидкости, так и в форме геля привело к увеличению  $N$ . Самая быстрая «инициализация» доставки МС была получена для слоя жидкости  $h=0,1$  мм при  $E=4$  мДж, требуемое число импульсов в этом случае было  $N=14$ . Самая быстрая «инициализация» для гелевой формы с  $C_{aa}=2\%$  была получена для  $E=4$  мДж,  $h=0,1$  мм, требуемое число лазерных импульсов в этом случае было  $N=46$ .

Зависимость скорости активной лазерной доставки ( $V_{MC}$ ) от  $h$  при  $E=4$  мДж представлена на рис. 2, б.

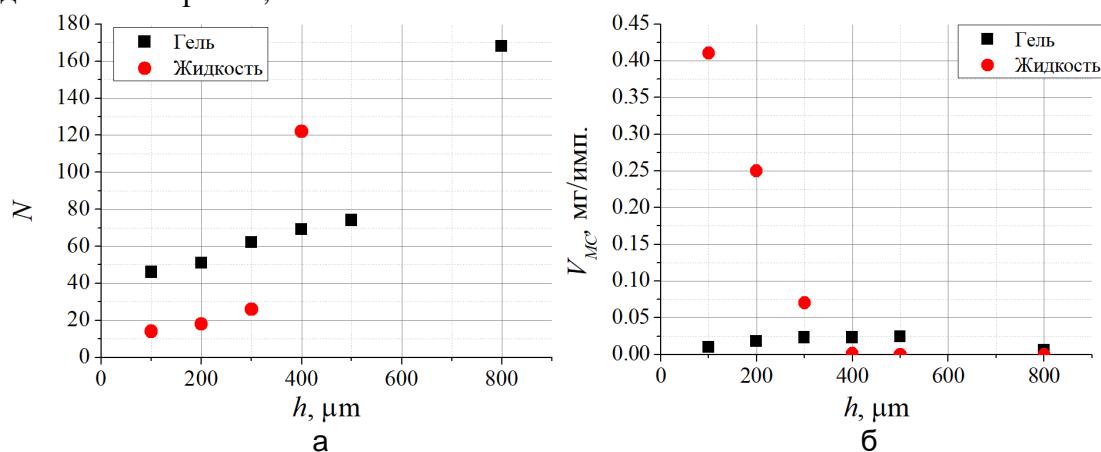


Рис. 2. Зависимость количества импульсов  $N$ , необходимых для «инициализации» активной лазерной доставки МС (а) и скорости активной лазерной доставки МС под ногтевую пластину (б) от толщины слоя жидкости (0,25% водный раствор МС) или геля

Увеличение толщины слоя жидкости привело к уменьшению скорости активной доставки метиленового синего ( $V_{MC}$ ). Максимальная скорость доставки ( $V_{MC}$ ) для слоя жидкости составила  $0,29 \pm 0,05$  мг/имп.

Зависимость  $V_{MC}$  от толщины слоя геля имеет экстремум: скорость доставки  $V_{MC}$  возрастает при изменении  $h$  от 100 до 500 мкм, а затем уменьшается при увеличении  $h$ .

от 500 до 800 мкм. Это может быть связано с особенностями экстракции МС в микроотверстие в геле под действием внешнего давления  $P$ . Максимальная скорость доставки ( $V_{MC}$ ) при использовании гелевой формы препарата составила  $0,024 \pm 0,004$  мг/имп.

**Заключение.** Таким образом, в работе исследованы особенности активной доставки метиленового синего в жидкой и гелевой форме. Установлена возможность микроперфорации ногтевой пластины под слоем препарата в обоих формах и его последующей активной доставки. Изучено влияние толщины слоя препарата на количество импульсов, необходимых для активной лазерной доставки, и скорость доставки препарата через одиночное микроотверстие в ногтевой пластине *in vitro*. Было обнаружено, что наиболее эффективно активная доставка 0,25% раствора метиленового синего осуществляется при воздействии на 100 мкм слой жидкости излучением Er:YLF-лазера с энергией импульса 4 мДж, при этом максимальная скорость доставки МС составляет  $0,29 \pm 0,05$  мг/имп. Наиболее эффективно активная доставка МС для гелевой формы препарата осуществляется при воздействии на 500 мкм слой геля излучением Er:YLF-лазера с энергией импульса 4 мДж, при этом максимальная скорость доставки МС составляет  $0,024 \pm 0,004$  мг/имп. Для активной доставки МС при использовании геля требуется большее чем при использовании жидкости количество лазерных импульсов, но при этом количество проникшего препарата в обоих случаях превышает терапевтически достаточную дозу – 5–10 мг/см<sup>2</sup>. Вместе с тем, использование лекарств в жидкой форме сопряжено с их растеканием и разбрзгиванием, кроме того, контроль толщины слоя лекарства, нанесенного на поверхность биоткани, является нетривиальной задачей и требует привлечения весьма дорогостоящего оборудования. Гелевая форма препарата лишена этих недостатков, что позволяет считать ее весьма перспективной для активной лазерной доставки.

## Литература

1. Lee W.R. et al. Transdermal drug delivery enhanced and controlled by erbium: YAG laser: a comparative study of lipophilic and hydrophilic drugs // Journal of controlled release. – 2001. – V. 75. – № 1-2. – P. 155–166.
2. Murdan S. Drug delivery to the nail following topical application // International Journal of Pharmaceutics. – 2002. – V. 236. – № 1-2. – P. 1–26.
3. Sklar L.R. et al. Laser assisted drug delivery: a review of an evolving technology // Lasers in surgery and medicine. – 2014. – V. 46. – № 4. – P. 249–262.
4. Belikov A.V. et al. Multi-beam laser-induced hydrodynamic shock waves used for delivery of microparticles and liquids in skin // Lasers in surgery and medicine. – 2015. – V. 47. – № 9. – P. 723–736.
5. Gonzales F.P. et al. Photodynamic inactivation of conidia of the fungi *Metarrhizium anisopliae* and *Aspergillus nidulans* with methylene blue and toluidine blue // Photochemistry and photobiology. – 2010. – V. 86. – № 3. – P. 653–661.

УДК 67.02

**ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ НАРЕЗНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК  
С ПОЛНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ АСТИГМАТИЗМА И ВЫСОКОЙ  
ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ**

Тараля М.И.<sup>1</sup>, Златов А.С.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Никоноров Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрена проблема создания плоских нарезных дифракционных решеток с коррекцией волнового фронта дифрагированного пучка с высокой дифракционной эффективностью. Показана причина уменьшения дифракционной эффективности нарезных дифракционных решеток с переменным периодом штрихов у существующих методов их изготовления, показан и опробован способ увеличения дифракционной эффективности такого типа решеток.

**Ключевые слова:** нарезная дифракционная решетка, дифракционная решетка с переменным периодом, дифракционная эффективность.

В задачах, связанных со спектральным анализом, длительное время наблюдается тенденция к увеличению требований к дифракционным решеткам – все чаще от них требуется не только решение задачи разложения света в спектр, но и решение задач компенсации астигматизма. За счет решения дополнительных задач дифракционной решеткой возможно увеличить спектральное разрешение спектральных устройств, уменьшить массогабаритные характеристики оптических приборов, упростить схемы оптических систем или добавить новые возможности спектральным приборам [1].

Классические спектральные приборы с высоким разрешением являются приборами скользящего падения с дифракционными решетками. Из-за скользящего падения на решетку излучение не фокусируется в направлении, перпендикулярном плоскости дисперсии, поэтому спектральное изображение точечного источника представляет собой отрезок, длина которого может в несколько раз превышать освещенную часть штриха решетки. Это приводит к утрате информации о пространственном распределении интенсивности излучения источника и уменьшению интенсивности выделяемых решеткой спектральных линий. Использование дифракционных решеток, период которых изменяется на апертуре по заданному закону, позволяет преодолеть эти ограничения. При изменении периода отражательной нарезной дифракционной решетки по ее апертуре изменяется кривизна волнового фронта дифрагированных от решетки пучков и положение спектрального фокуса, что приводит к тому, что плоская решетка с требуемым систематическим изменением шага, используемая в коллимированном падающем пучке, будет фокусировать дифрагированный пучок.

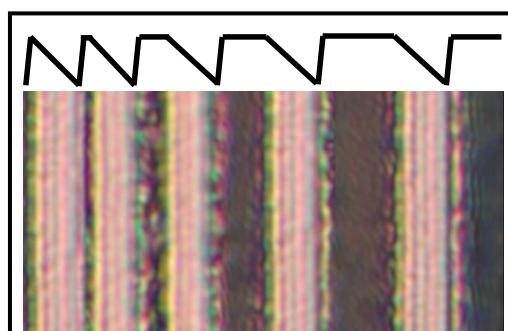


Рис. 1. Фотография штрихов нарезной дифракционной решетки с переменным шагом. При измерении решетка была повернута на угол блеска. Рабочие грани решетки – светлые, исходная алюминиевая поверхность заготовки – темная

Большая часть дифракционных решеток для спектральных задач является нарезными, они изготавливаются на делительных машинах с алмазным резцом [2]. Глубина нарезаемого штриха определяется характеристиками резца, нагрузкой на нем и характеристиками металлического слоя, на котором выполняется нарезка. Благодаря этим факторам обеспечивается постоянство глубины штриха на протяжении всей решетки (рис. 1). Переменный шаг при неизменной глубине штриха приводит к тому, что длина самого штриха увеличивается, а длина рабочей грани решетки остается прежней. Сложившаяся ситуация приводит к падению эффективности дифракционной решетки.

Цель работы состояла в модернизации делительной машины с возможностью удаленно менять глубину штриха в процессе нарезки дифракционной решетки.

Работа проводилась на делительной машине, предназначеннной для нарезки дифракционных решеток с частотой штрихов от 25 до 3600 штр/мм и углами блеска рабочей грани от 5 до 65 градусов. Измерения характеристик решеток проводились на автоколлимационной установке для измерения характеристик плоских отражательных дифракционных решеток (рис. 2). В ней сколлинированное излучение источника направляется на установленную на поворотном столе решетку и при разных углах разворота дифракционной решетки измеряется интенсивность излучения, идущего по той же оптической оси, что и исходное излучение, но в противоположном направлении. Между коллиматором и измеряемой дифракционной решеткой ставится светоделитель и дифрагированное излучение отводится в сторону и фокусируется на фотоприемник.

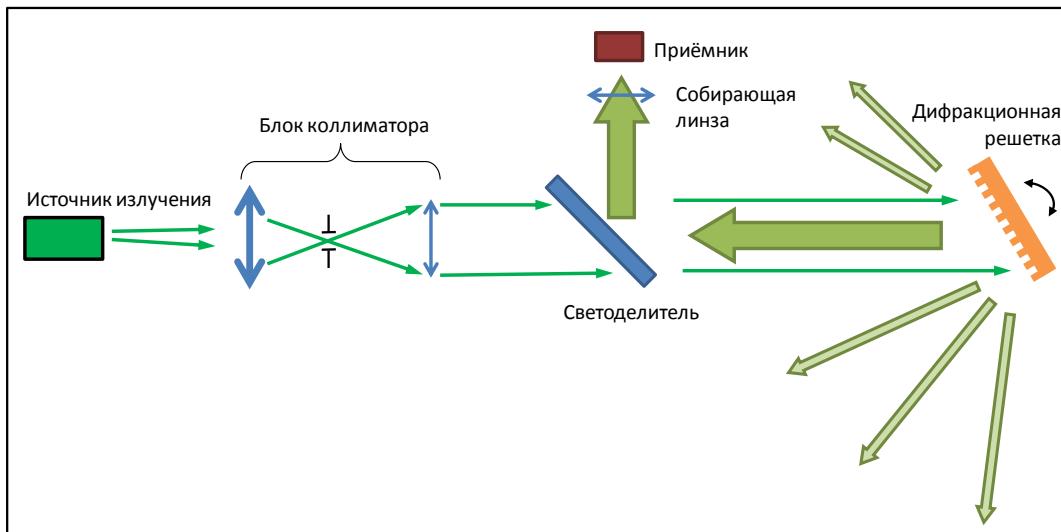


Рис. 2. Схема автоколлимационной установки для измерения характеристик плоских отражательных дифракционных решеток. В качестве источника излучения используется твердотельный лазер с длиной волны 532 нм или газовый Не-Не лазер

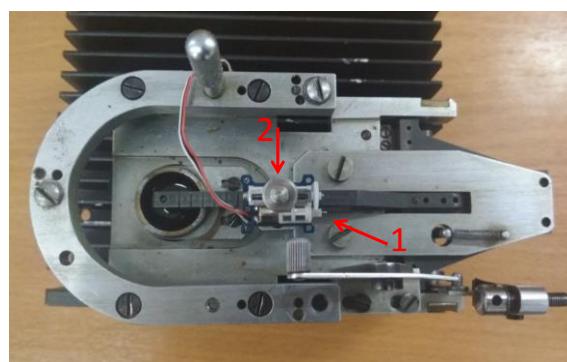


Рис. 3. Модернизированная резцовая каретка делительной машины:  
1 – сервопривод; 2 – установленная на перемещаемой площадке нагрузка с длиной волны 632,8 нм

В результате проведенной работы была доработана резцовая каретка делительной машины – на участке демпфирующего противовеса была размещена компактная линейно перемещаемая автоматизированная площадка с удаленным управлением (рис. 3). На площадке размещается нагрузка, которую в процессе нарезки можно удаленно перемещать и таким образом изменять нагрузку на резце.

Для управления положением площадки с нагрузкой создана управляющая компьютерная программа в среде LabVIEW [3, 4] и микропрограмма на языке Си для микроконтроллера Atmel atmega8а для непосредственного управления сервоприводом, к микроконтроллеру дополнительно подключен датчик положения балки делительной машины для отслеживания номера текущего нарезаемого штриха. Связь между микроконтроллером и персональным компьютером с запущенной управляющей программой осуществляется по протоколу UART через USB-UART мост на базе микросхемы Silicon Labs CP2102. Микропрограмма разработана с учетом возможности ее дальнейшего интегрирования в пульт управления делительной машиной для нарезания дифракционных решеток. В настоящее время перед нарезкой решетки в управляющей программе заранее задается диапазон перемещения площадки с нагрузкой, величина шага площадки и частота изменения ее положения относительно номера нарезаемого штриха.

В результате проведенных испытаний была нарезана тестовая дифракционная решетка с равномерно изменяющейся в процессе нарезки частотой от 600 до 300 штр/мм и углом блеска порядка 7 градусов. За счет изменения положения нагрузки в процессе нарезки решетки удалось добиться увеличения длины рабочей грани по мере увеличения периода – в конце нарезки, где период решетки увеличился в 2 раза, увеличение длины рабочей грани составило 70%, что привело к увеличению эффективности дифракционной эффективности в области последних штрихов на 60% и увеличению общей эффективности дифракционной решетки на 25%.

Результаты работы позволяют улучшить характеристики нарезных дифракционных решеток. В дальнейшем для возможности отслеживания прилагаемой на резец нагрузки планируется добавить систему обратной связи с целью обеспечения возможности точной подстройки положения площадки с нагрузкой в процессе нарезки.

## Литература

1. Shi R. et al. Designing and fabricating diffractive optical elements with a complex profile by interference // Optics letters. – 2011. – V. 36. – № 20. – P. 4053–4055.
2. Harada T., Kita T. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings // Applied Optics. – 1980. – V. 19. – № 23. – P. 3987–3993.
3. Батоврин В.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В., Папуловский В.Ф. LabView: практикум по основам измерительных технологий: учебное пособие для вузов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 208 с.
4. Федосов В.П., Нестеренко А.К. Цифровая обработка сигналов в LabView: учеб. пособие / Под ред. В.П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.

УДК 531.7, 681.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ СБОРКИ ЭЛЕМЕНТОВ КАТОДА  
РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ**

Терентьев Н.Ю.<sup>1</sup>, Митрофанов С.С.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н., доцент Митрофанов С.С.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрена конструкция разработанного устройства для измерения положения спирали рентгеновской трубы и приведена методика работы с ней. С помощью данного устройства были исследованы несколько партий рентгеновских трубок на предприятии и проведен анализ полученных результатов измерений.

**Ключевые слова:** рентгеновская трубка, спираль, калибровка, измерение положения, разработка конструкции.

**Введение.** Высокие требования потребителей к качеству продукции требуют постоянного совершенствования уровня производства, так как текущее состояние оборудования не всегда может обеспечить необходимое качество продукции. Так, на предприятии, имеющаяся необходимость повышения качества сборки рентгеновской трубы, а именно, более точной установки спирали в катоде трубы, упирается в отсутствие объективных средств контроля положения спирали в катоде трубы. Как известно спираль является источником электронов, которые под действием ускоряющего напряжения бомбардируют мишень анода для генерации рентгеновского излучения [1]. Положение спирали в трубке влияет на размер фокусного пятна, являющееся проекцией электронного пучка на мишень анода. Этот важный параметр определяет резкость теневого изображения объекта. На предприятии зачастую используют специальную оправу для визуальной оценки положения оправы, которая не может обеспечить требуемую точность измерения из-за субъективных ошибок измерения.

**Конструкция установки.** Для решения задачи с измерением положения спирали кафедра КФиВИ Университета ИТМО по запросу предприятия, выпускающее рентгеновские трубы, изготавлила устройство, представленная на рис. 1.

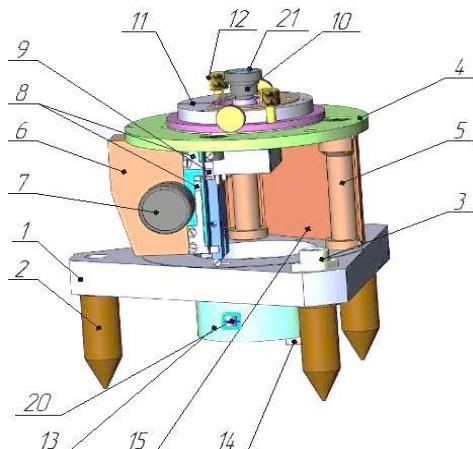


Рис. 1. Устройство определения положения спирали катода трубы

Установка состоит из массивного основания 1, которое установлено на трех опорах 2 [2]. На верхней поверхности основания располагается пузырьковый уровень, с помощью которого устанавливается горизонтальность устройства. В верхней части оправки смонтирована плата 4 на трех стойках 5, на которой закреплено устройство фиксации 11 баллона трубы, фиксируемое винтами 12, и механизм перемещения 6 видеокамеры 10. Устройство имеет два съемных устройства фиксации, предназначенные для закрепления типовых трубок с разными диаметрами коварового кольца.

Перемещение видеокамеры 10 осуществляется маховичками 7, а выбор необходимого типоразмера трубки осуществляется по меткам 8 и индексу 9. Нижняя часть основания закрыта крышкой 13 с установленным на ней разъемом 14 USB для подключения персонального компьютера. Там же находится выключатель 20 прожектора 21, состоящий из шести светодиодов и обеспечивающий освещение спирали.

**Методика работы.** Наблюдение и измерения производятся с помощью управляющей программы на персональном компьютере (рис. 2). Перед началом работы необходимо провести калибровку видеосистемы.



Рис. 2. Изображения процесса работы: процесс калибровки (а); процесс измерения (б)

Для этого на устройство фиксации баллона рентгеновской трубы устанавливается калибровочное устройство. Это устройство состоит из стакана (деталь черного цвета), который одним торцом устанавливается на устройстве фиксации, а противоположный торец стакана имеет резьбу, по которой завинчивается осветитель. Осветитель прижимает к торцу линейную шкалу с ценой деления 0,1 мм. После получения резкого изображения шкалы, которое достигается перемещением видеокамеры механизмом фокусировки, на экране монитора наблюдается шкала с наложенными на нее перекрестьем и прямоугольником с диагоналями, которые формируются программными средствами (рис. 3). Перекрестье задает центр видеосистемы, а размеры прямоугольника – текущий масштаб.

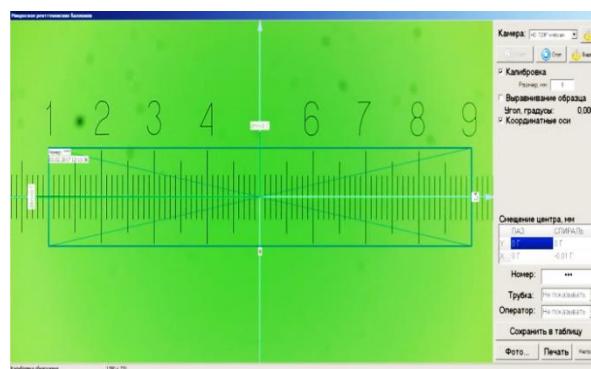


Рис. 3. Вид интерфейса программы в процессе калибровки

В специальном режиме «Калибровка» необходимый масштаб задается путем растягивания границ прямоугольника на максимальный видимый размер по шкале и установление этого значения в окне «Размер, мм». Установка перекрестья в центр калибровочной шкалы и фиксация значения измеряемого размера задается нажатие мыши на центр перекрестья шкалы. Можно сказать, что после калибровочных операций визирная ось видеокамеры приведена в центр посадочного цилиндра

фиксатора, на котором устанавливается трубка, т.е. дальнейшие измерения смещения спирали и паза будут производиться относительно центра изображения.

После проведенной калибровки установка готова к работе. Калибровочное устройство убирается и на устройстве фиксации закрепляется баллон трубы. В управляющей программе будет наблюдаться изображение спирали и паза. В программе выбирается режим «Выделение паза», после чего появляется прямоугольник зеленого цвета. Как и в режиме калибровки с помощью мыши растягиваются границы прямоугольника до совмещения их с границами паза. Те же операции производятся для спирали при переходе в режим «Выделение спирали». Программа автоматически определяется центр прямоугольников, значения которых являются смещениями паза или спирали. Измеренные данные по осям  $X$  и  $Y$  приводятся в окне «Смещение центра, мм», по которым выставляется годность или брак изделия соответствующими буквами Г и Б, как показано на рис. 4. Результаты измерения можно сохранить в файл MS Excel, нажав кнопку «Сохранить в таблицу».

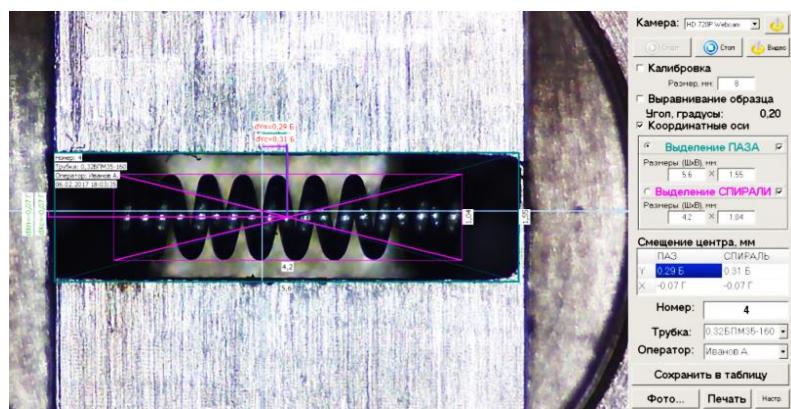


Рис. 4. Вид результата процесса измерения

**Экспериментальные результаты.** На описанной установке были проведены измерения положения спирали и паза в изготавливаемых трубках. Измерения проводились по двум партиям однотипных трубок 0,32БПМ35-160, которые, соответственно, состояли из 52 и 58 трубок. При этом результаты снимались для первой партии в одном положении, а для второй партии двух положениях через 180° вокруг оптической оси видеокамеры. Также для второй партии снимались видимые дефекты элементов катода.

На рис. 5 и 6 представлены полигоны распределения частот результатов измерений для каждой оси смещения, относящиеся к первой партии трубок. Для второй партии полигоны имеют похожий вид, поэтому они здесь не приведены.

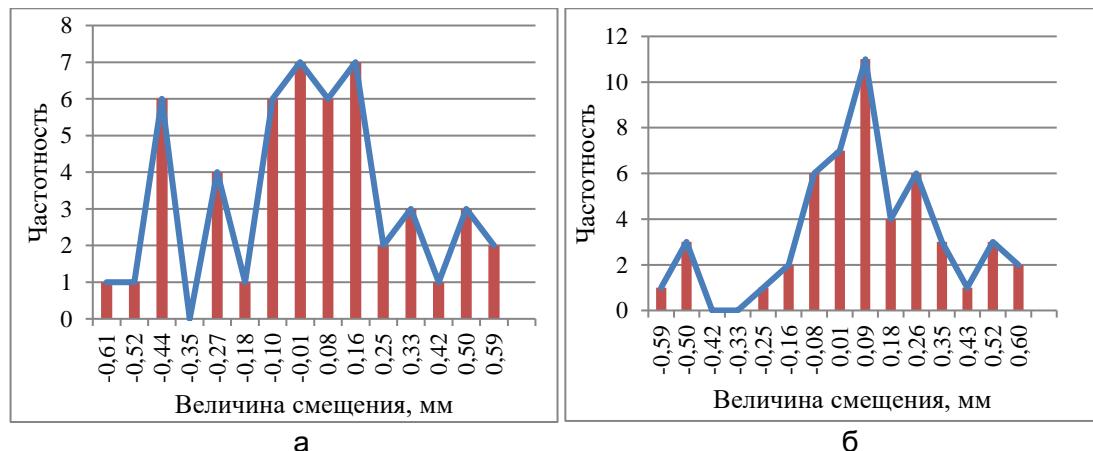


Рис. 5. Полигоны частот смещений спирали: по оси X (а); по оси Y (б)

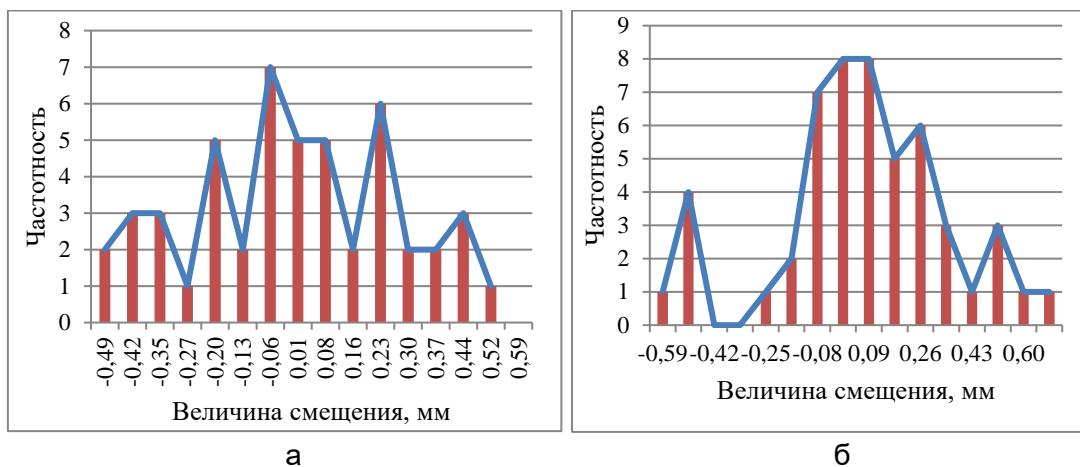


Рис. 6. Полигоны частот смещений паза: по оси X (а); по оси Y (б)

Анализируя полигоны распределения, можно сказать, что во всех случаях смещения по оси Y имеет явную тенденцию к нормальному распределению с параметрами, указанными в табл. 1, тогда как смещение по оси X из-за большой разницы значений установить закон распределения сложно.

Это может говорить о проблемах технологического процесса изготовления деталей рентгеновских трубок и нестабильности производства в целом. В процессе исследования было обнаружено в большинстве трубок дефекты спирали, такие как наклоны вокруг различных осей, разная длина спирали и разный диаметр витков, которые невозможно обнаружить невооруженным глазом.

Тем не менее, в программе MC Excel был проведен анализ результатов измерений. После исключения из каждой группы измерений грубых промахов для каждой оси смещения X и Y спирали и паза были вычислены среднее значение и среднеквадратическое отклонение (СКО). Результаты приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Результаты расчета смещения спирали и паза для каждой оси смещения

	Партия №1				Партия №2			
	Спираль		Паз		Спираль		Паз	
	Ось X	Ось Y	Ось X	Ось Y	Ось X	Ось Y	Ось X	Ось Y
Среднее значение, мм	-0,029	0,042	-0,035	0,035	0,062	-0,084	0,046	-0,080
СКО, мм	0,297	0,267	0,259	0,281	0,248	0,208	0,250	0,206

Таблица 2. Результаты расчета смещения спирали относительно паза

	Партия №1		Партия №2	
	Ось X	Ось Y	Ось X	Ось Y
Среднее значение, мм	-0,018	0,005	-0,016	0,003
СКО, мм	0,076	0,027	0,076	0,032

При допуске  $\pm 0,1$  мм на точность установки спирали и паза из двух партий только около 15% трубок являются годными. Т.е. текущее оборудование предприятия не обеспечивает требуемую точность изготовления катода и из-за отсутствия точных измерительных приборов брак в трубке обнаруживается тогда, когда изделие уже собрано и готово к работе. Разработанная установка позволяет обнаруживать этот брак на этапе изготовления катодного узла задолго до полной сборки трубы, вследствие чего.

Что касается исследования смещения спирали относительно паза, то тут в большинстве случаев смещение незначительно. Это говорит о том, что сам катод

изготавлиают достаточно точно, а основные погрешности происходят на конечном этапе сборки собранного катода с баллоном трубки.

**Заключение.** В работе была рассмотрена изготовленное устройство для измерения смещения спирали рентгеновской трубки и принцип ее работы. На основе проведенных исследований смещений спирали и паза нескольких партий трубок можно сказать, что устройство показала свою работоспособность и эффективность. По измеренным данным можно определять не только брак или годность каждого изделия, но и проводить анализ технологических процессов изготовления элементов рентгеновской трубки. Такое устройства позволяет предприятию повысить скорость изготовление и качество рентгеновских трубок.

### **Литература**

1. Иванов С.А., Щукин Г.А. Рентгеновские трубы технического назначения. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 200 с.
2. Митрофанов С.С. Устройство определения положения спирали катода трубы: техническое описание и руководство пользователя. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 23 с.

УДК 535.23

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ ВИДА ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО НА ПОРОГ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Терещенко И.Б.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.т.н., профессор Губанова Л.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

Исследована возможность создания высокоотражающего оптического покрытия с контролируемым порогом разрушения мощным лазерным излучением. Структура покрытия состоит из тридцати чередующихся четвертьволновых слоев нитрида кремния и диоксида кремния и подложки из серебра. Один из слоев нитрида кремния имеет полуволновую толщину для получения конструкции интерферометра Фабри-Перо.

**Ключевые слова:** технология оптических покрытий, интерферометр Фабри-Перо, порог разрушения лазерным излучением, высокоотражающие покрытие, нитрид кремния, диоксид кремния.

**Введение.** Использование оптических деталей, таких как линзы и зеркала, в качестве систем трассировки высоких энергий вызывает технологические трудности, так как оптические детали не способны выдержать высокой плотности мощности, что приводит к их деформации или разрушению. На сегодняшний день различают несколько главных механизмов разрушения материала [1, 2]. Первый и наиболее частый механизм связан с термическим лазерным разрушением, в котором поглощенная порция лазерной энергии переходит в тепло. Поглощение лазерного излучения происходит локально и со временем температура увеличивается, переводя материал в состояние плавления или испарения. Второй механизм связан с диэлектрическим пробоем и третий с многофотонной ионизацией, в которой один электрон поглощает несколько квантов света, переходя на более высокие энергетические уровни.

Интерференционные покрытия, нанесенные на оптические детали, позволяют распределять поглощенную энергию лазерного излучения так, чтобы это не приводило к разрушению детали. На сегодняшний день существует множество [3–6] исследований на тему выбора оптических материалов, которые имеют высокий порог разрушения лазерного излучения. При выборе пленкообразующих материалов в качестве формирующих слоев оптического покрытия стоит так же учитывать их показатели преломления. Так, чем больше эта разница, тем меньше слоев требуется для задания необходимого коэффициента отражения на выбранной длине волны [7].

Исследования в области взаимодействия мощного лазерного излучения и оптических материалов направлены на поиск материалов с высоким порогом разрушения лазерным излучением. В данной работе предложена конструкция многослойной оптической структуры, позволяющая контролировать порог разрушения.

**Материалы.** Оптические многослойные покрытия широко используются в оптической промышленности для управления характеристиками пропускания и отражения линз и зеркал. Однако они могут быть подвержены разрушению, так как содержат слои, толщины которых меньше длины волны излучения, а в пленкообразующих материалах могут присутствовать поглощающие элементы [2–4].

Сохранение и поддержание вакуума в вакуумных камерах является основополагающей задачей для стабильности работы ряда устройств. Все оптический диагностики, вводимые в камеру, должны обеспечить защиту от разрушения вакуумных окон. Выделим несколько средств защиты: пассивные и активные. Примерами пассивных мер защиты является наличие угла падения на вакуумные окна, двойные вакуумные стекла. Так, излучение, падающее под углом, не попадет обратно в

оптическую схему зондирования излучения и не нарушит ее работу. Двойные вакуумные окна позволяют отслеживать изменение параметров вакуума между двумя окнами. Активной мерой защиты вакуумного окна является шибер, который закрывается при изменении параметров вакуумного объема между двумя окнами. Однако оптической пробой на вакуумном окне пройдет быстрее, чем закроется шибер, поэтому этих мер недостаточно.

В качестве меры защиты вакуумного окна предлагается ввести перископ, состоящий из двух зеркал, на одном из которых будет зеркальное покрытие, имеющее порог разрушения ниже, чем у вакуумного окна.

В качестве оптических материалов для формирования зеркального многослойного оптического покрытия использовались диоксид кремния и нитрид кремния. Известно, что материал  $\text{Si}_3\text{N}_4$  имеет порог разрушения лазерным излучением ниже на два порядка, чем у  $\text{SiO}_2$  [8]. Применение  $\text{Si}_3\text{N}_4$  позволяет применить технологию реактивного магнетронного распыления, обеспечивающую более высокое средство слоев, входящих в состав покрытия, между собой, а также с подложкой, за счет того, что для нанесения обоих типов слоев используется одна и та же кремниевая мишень. Это обеспечивает более высокую адгезию и, следовательно, лучшую стабильность при термическом расширении. Номинальный показатель преломления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (2,01), что позволяет проектировать необходимо спектральную характеристику с меньшим количеством слоев (таблица).

Таблица. Параметры пленкообразующих материалов  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$

	Аббревиатура	Материал	Показатель преломления	Порог разрушения лазерным излучением, Дж/см <sup>2</sup>
1	В	$\text{Si}_3\text{N}_4$	2,01	0,65
2	Н	$\text{SiO}_2$	1,45	13,3

Покрытие состоит из чередующихся четвертьволновых слоев и одним полуволновым, подобранным таким образом, чтобы система слоев являлась интерферометром Фабри-Перо. Авторы статьи [9] моделируют процесс взаимодействия лазерного излучения с рассчитанным четвертьволновым многослойным покрытием. Моделирование показывает, что использование четвертьволновых слоев при создании зеркала на выбранном участке спектра приводит к высокому поглощению в слоях, граничащих с воздухом, при использовании источников излучения высокой плотности мощности (рис. 1).

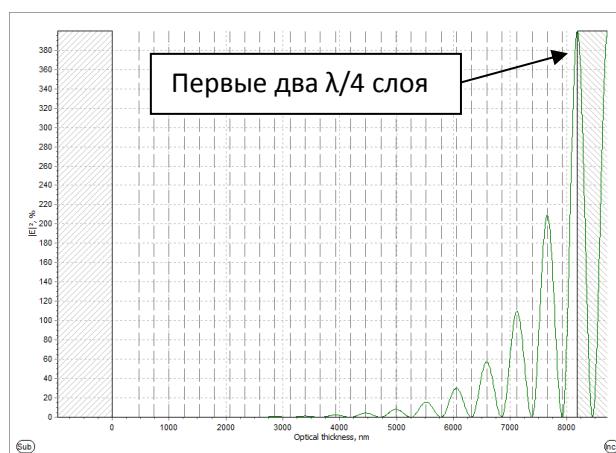


Рис. 1. Квадрат напряженности электрического поля в слоях четвертьволнового зеркала, состоящего из 30 слоев

Как видно из рис. 1, максимум квадрата напряженности электрического поля приходится на первые два четвертьволновых слоя. Это говорит о том, что лучше всего

отражают слои, примыкающие к воздуху, а вглубь покрытия проходит меньше 5% падающей энергии.

При реализации конструкции интерферометра Фабри-Перо, резко меняется поведение отражательной способности покрытия (рис. 2). В приведенном покрытии видно, что максимальная энергия приходится на слои под номером 20, 21, 22 со стороны подложки. Это слои имеют конструкцию H2BH, где 2B – это полуволновой слой нитрида кремния.

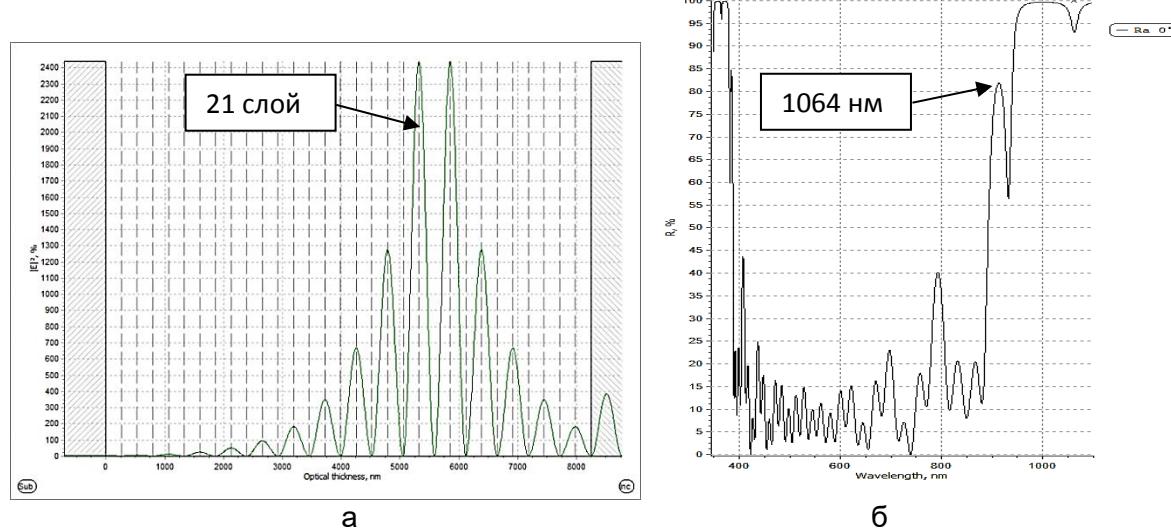


Рис. 2. Квадрат напряженности электрического поля структуры  $\text{ПВ}(\text{НВ})^8(\text{H2BH})(\text{ВН})^5$ , состоящего из 30 слоев (а); спектральная характеристика рассчитанного покрытия (б). В качестве подложки ( $\Pi$ ) используется КУ-1

Как видно из таблицы, нитрид кремния имеет на два порядка меньше порог разрушения, чем диоксид кремния. Поэтому необходимо использовать этот материал в качестве полуволнового слоя для того, чтобы в нем сосредоточилось максимальное количество энергии лазерного излучения. Исходная структура покрытия, имитирующая интерферометр Фабри-Перо состоит из симметричной структуры относительно центрального полуволнового слоя. Такая структура обеспечит большее значение квадрата напряженности электрического поля, однако на спектральной кривой такого покрытия, будет наблюдаться провал отражения на той длине волны, на которой строится данное покрытие (рис. 3).

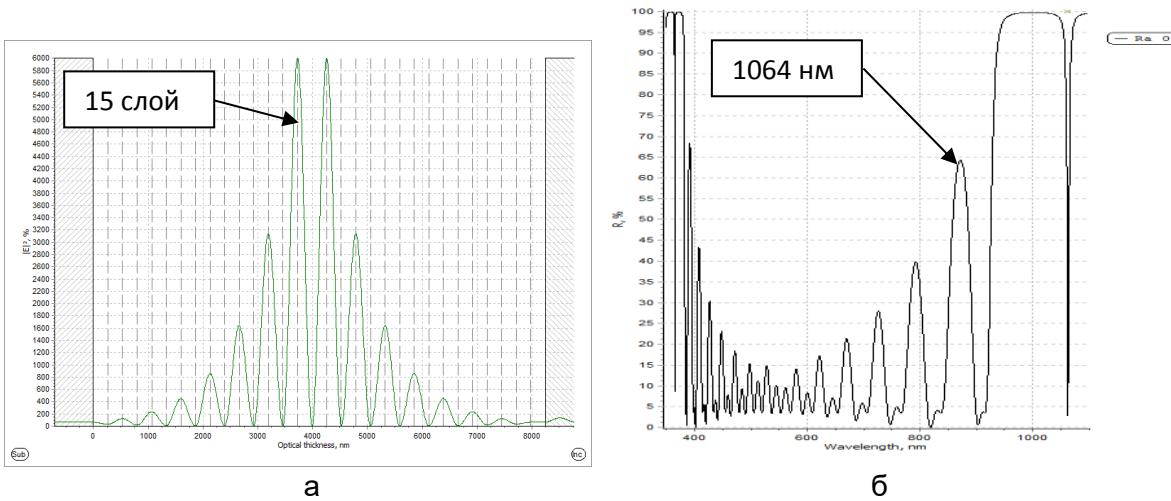


Рис. 3. Квадрат напряженности электрического поля структуры  $\text{ПВ}(\text{НВ})^6(\text{H2BH})(\text{ВН})^7$ , состоящего из 30 слоев (а); спектральная характеристика рассчитанного покрытия (б). В качестве подложки ( $\Pi$ ) используется КУ-1

Для увеличения коэффициента отражения на выбранной длине волны и обеспечения высокого значения квадрата напряженности электрического поля центральный слой была нарушена симметрия конструкции покрытия. Однако полученное значение коэффициента отражения 93,2% не удовлетворяет требованиям создания высокоотражающего зеркала. Для повышения коэффициента отражения предложенная конструкция была воспроизведена на подложке из серебра (рис. 4).

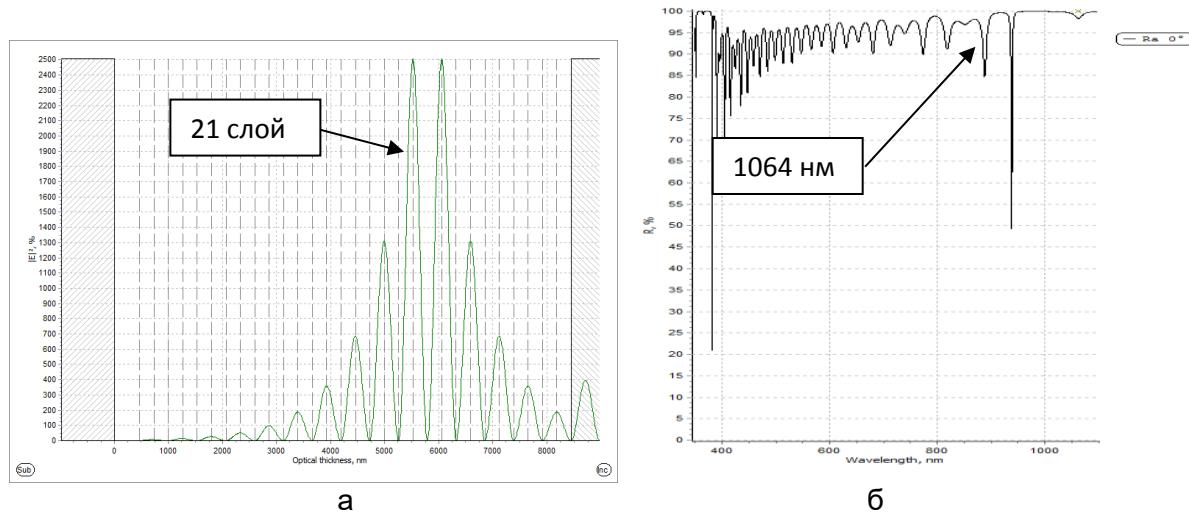


Рис. 4. Квадрат напряженности электрического поля структуры  $\text{ПВ}(\text{НВ})^8(\text{Н}_2\text{ВН})(\text{ВН})^5$ , состоящего из 30 слоев (а); спектральная характеристика рассчитанного покрытия (б).  
В качестве подложки (П) используется серебро

Как видно из рис. 4, значение коэффициента отражения на длине волны 1064 нм увеличилось до 98,3%. Таким образом, получилось увеличить коэффициент отражения на 5%, что может быть решающим фактором в области использования высокointенсивных источников излучения.

**Заключение.** Целью данной работы является разработка конструкции оптического покрытия, которое позволяет контролировать порог разрушения лазерным излучением, а также сохранения высокого коэффициента отражения на выбранной длине волны. Следующим этапом будет моделирование процесса теплопередачи в рассчитанной структуре покрытия при выбранном источнике электромагнитного излучения.

## Литература

1. Wood R.M. Laser-Induced Damage of Optical Materials. – Monograph. – Bristol; Philadelphia: IOP Publishing, 2003. – 241 p.
2. Ristau D., Jupé M., Starke K. Laser damage thresholds of optical coatings // Thin Solid Films. – 2009. – V. 518. – № 5. – P. 1607–1613.
3. Ling X., Liu S., Liu X. The effect of water vapor on nanosecond laser damage resistance of optical coatings in vacuum // Optik. – 2018. – V. 164. – P. 654–660.
4. Li J. et al. Effects of Deposition Temperature on Structural, Optical Properties and Laser Damage of  $\text{LaTiO}_3$  Thin Films // Advances in Condensed Matter Physics. – 2018. – V. 2018. – 6 p.
5. Day T. et al. Impacts of  $\text{SiO}_2$  planarization on optical thin film properties and laser damage resistance // Laser-Induced Damage in Optical Materials. – 2016. – V. 10014. – P. 1001422.
6. Bassiri R., Clark C., Martin I.W. Investigating the relationship between material properties and laser induced damage threshold of dielectric optical coatings at 1064 nm // Laser-Induced Damage in Optical Materials. – 2015. – V. 9632. – P. 963204-1–963204-8.

7. Путилин Э.С., Губанова Л.А. Оптические покрытия. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 227 с.
8. Soong K. Experimental determination of damage threshold characteristics of IR compatible optical materials [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://portal.slac.stanford.edu/sites/ard\\_public/Lists/Publications/Attachments/14/Experimental%20Determination%20of%20Damage%20Threshold%20Characteristics%20of%20IR%20Compatible%20Optical%20Materials.pdf](https://portal.slac.stanford.edu/sites/ard_public/Lists/Publications/Attachments/14/Experimental%20Determination%20of%20Damage%20Threshold%20Characteristics%20of%20IR%20Compatible%20Optical%20Materials.pdf), свобод.
9. Ocak M., Sert C., Okutucu T.Ö. Investigation of non-quarter wave design on multilayer optical thin film coatings from a heat transfer point of view // SPIE. – 2013. – V. 8885. – P. 888506.

УДК 681.783, 681.786

**ВЫБОР ОБЪЕКТИВА МАКЕТА МУЛЬТИ-МАТРИЧНОГО  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ  
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПО КРИТЕРИЮ СРАВНЕНИЯ ГЛАВНЫХ  
МОМЕНТОВ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛУЧЕННОСТИ  
В ИЗОБРАЖЕНИИ ТОЧЕЧНОГО ТЕСТ-ОБЪЕКТА**

Тонг Мин Хоа<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Коняхин И.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены результаты выбора объектива макета оптико-электронной системы (ОЭС) измерения координат контрольных точек крупногабаритного объекта по результатам экспериментального исследования полевых aberrаций. Контролируемым объектом является главное зеркало большого полноповоротного радиотелескопа, для измерения положения отражающих секций которого необходима разработка ОЭС с широким угловым полем. В качестве практического критерия оценки полевых aberrаций использованы главные моменты функции распределения облученности в формируемом объективом изображении.

**Ключевые слова:** оптико-электронная измерительная система, мульти-матричный приемный блок, полевые aberrации, широкоугольный объектив, сравнение главных моментов функции облученности.

**Введение.** Для контроля деформаций крупногабаритных объектов используются оптико-электронные измерительные системы, реализующие измерение положения «критических» точек конструкции [1–3]. В частности, необходимы измерения формы главного зеркала (ГЗ) крупногабаритных радиотелескопов [4]. Особенностью оптико-электронной системы, измеряющей положение нескольких (до двух десятков) контрольных точек (ГЗ) является использование мульти-матричной схемы, согласно которой группа фотоприемных матриц использует единый приемный объектив [5]. Для реализации мульти-матричной схемы необходим длиннофокусный объектив с угловым полем не менее  $10^\circ$ , при этом для высокоточного измерения координат источников оптического излучения, расположенных в контрольных точках требуется симметрия распределения облученности в формируемом изображении [6], что определяет критерий оценки полевых aberrаций объектива.

**Экспериментальная установка.** Для физического моделирования мульти-матричного блока контроля положения точек ГЗ необходимо было осуществить выбор объектива по критерию формирования симметричного мало-аберрационного изображения в широких угловых полях – для этого был собран экспериментальный стенд и проведено исследование объективов трех типов (рис. 1).

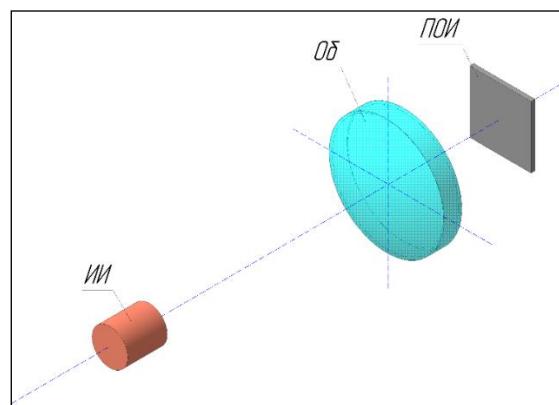


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Характеристики экспериментального стенда:

- расстояние до источника излучения (ИИ) в виде инфракрасного излучающего диода с диаметром излучающей площадки 3 мм (тест-объект) до испытуемого объектива (Об) составляло  $R \approx 20$  м;
- объектив был закреплен на поворотной подвижке и тестиировался в диапазоне углов  $\alpha \pm 13^\circ$  (фактически, исходя из симметрии оптических элементов повороты выполнялись только на положительные углы) – см. рис. 1;
- в качестве анализатора формируемого изображения применялась 5 Мп КМОП-матрица фирмы EVS;

Были исследованы три объектива, паспортное значение углового поля которых не менее  $10^\circ$ :

1. объектив коллиматорный лабораторный (ОСК-2),  $f' = 1600$  мм,  $D = 150$  мм;
2. объектив аэрофотосъемочный,  $f' = 750$  мм,  $D = 120$  мм;
3. объектив фотопроприационный РФ-5 (ЛОМО);  $f' = 450$  мм,  $D = 45$  мм.

В соответствии с методикой, производилась фокусировка Об (по тест-объекту), затем осуществлялся съем кадров при различных углах поворота Об (шаг  $1^\circ$ ).

Далее, выполнялся анализ полученных кадров, и оценивалось качество формируемых изображений по критерию симметрии функции полевой aberrации.

Для оценки качества полученных изображений были использованы моменты инерции функции распределения облученности в изображении точечного тест-объекта.

Вычисления осуществлялись по алгоритму:

1. определяются первый центральный момент: координаты центра «тяжести» изображения объекта

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (E_{ij} x_{ij})}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N E_{ij}}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (E_{ij} y_{ij})}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N E_{ij}}; \quad (1)$$

2. определяются промежуточные моменты изображения по каждой из координат

$$J_x = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(x_{ij} - x_c) E_{ij}], \quad J_y = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(y_{ij} - y_c) E_{ij}], \\ J_{xy} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(x_{ij} - x_c)(y_{ij} - y_c) E_{ij}]; \quad (2)$$

3. рассчитываются главные моменты, позволяющие оценить качество формируемого изображения:

$$J_{1,2} = \frac{J_x + J_y}{2} \pm \sqrt{0,25(J_x - J_y)^2 + J_{xy}^2}. \quad (3)$$

Сравнив главные моменты  $J_1$  и  $J_2$ , можно получить информацию о симметричности функции, определяющей облученность изображения объекта и оценить полевые aberrации Об.

Критерием качества Об для оптико-электронной системы, регистрирующей координаты изображения точечного объекта с помощью матричного фотоприемника можно полагать близость отношения  $J_2/J_1$  к единице (допустимое значение – не менее 0,75), что определяет требуемую осевую симметрию функции распределения облученности.

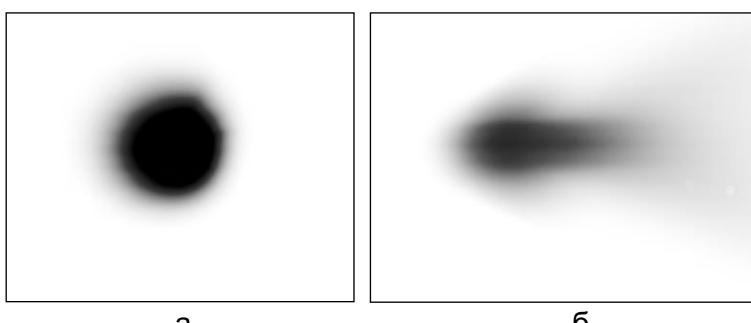
**Результаты эксперимента.** Результаты экспериментов для Об коллиматорного приведены в табл. 1 (здесь и далее выделенным шрифтом указаны значения, не удовлетворяющие установленному критерию).

Таблица 1. Зависимость главных моментов от угла поворота Об коллиматорного

$\alpha$	$0^\circ$	$1^\circ$	$2^\circ$	$3^\circ$	$4^\circ$	$5^\circ$	$6^\circ$	$7^\circ$	$8^\circ$	$9^\circ$
$J_1 \cdot 10^8$	1,68	1,48	1,60	2,11	2,64	2,75	3,09	3,29	3,59	3,87
$J_2 \cdot 10^8$	1,55	1,39	1,42	1,73	1,92	2,02	1,95	1,65	1,36	1,00
$J_2/J_1$	0,92	0,94	0,88	0,82	0,73	0,74	<b>0,63</b>	<b>0,50</b>	<b>0,38</b>	<b>0,26</b>

По данным, приведенным в табл. 1 предельный угол поля зрения не превышает  $5^\circ$ .

Изображение тест-объекта, формируемое объективом приведено на рис. 2.

Рис. 2. Изображение при:  $\alpha=0^\circ$  (а) и  $\alpha=10^\circ$  (б)

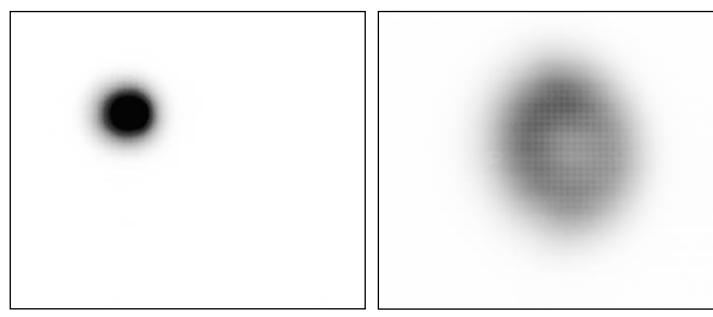
Результаты экспериментов для Об аэрофотосъемочного приведены в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость главных моментов от угла поворота Об аэрофотосъемочного

$\alpha$	$0^\circ$	$2^\circ$	$4^\circ$	$63^\circ$	$8^\circ$
$J_1 \cdot 10^7$	0,49	0,48	0,54	1,03	3,21
$J_2 \cdot 10^7$	0,44	0,44	0,46	0,96	2,42
$J_2/J_1$	0,91	0,91	0,85	0,92	0,75

По данным, приведенным в табл. 2 предельный угол поля зрения не превышает  $8^\circ$ .

Изображение тест-объекта, формируемое этим объективом приведено на рис. 3.

Рис. 3. Изображение при:  $\alpha=0^\circ$  (а);  $\alpha=8^\circ$  (б)

Результаты экспериментов для Об РФ-5 (ЛОМО) приведены в табл. 3. Изображение тест-объекта, формируемое этим объективом приведено на рис. 4.

Таблица 3. Зависимость главных моментов от угла поворота Об РФ-5 (ЛОМО)

$\alpha$	$0^\circ$	$1^\circ$	$2^\circ$	$3^\circ$	$4^\circ$	$5^\circ$	$6^\circ$	$7^\circ$	$8^\circ$	$9^\circ$	$10^\circ$	$11^\circ$	$12^\circ$	$13^\circ$
$J_1 \cdot 10^8$	1,80	1,90	1,87	1,91	1,73	1,83	1,82	1,78	1,78	1,76	2,01	1,91	1,88	1,80
$J_2 \cdot 10^8$	1,69	1,77	1,73	1,79	1,62	1,77	1,74	1,73	1,70	1,70	1,94	1,80	1,77	1,54
$J_2/J_1$	0,94	0,93	0,93	0,94	0,94	0,96	0,95	0,97	0,95	0,97	0,96	0,94	0,94	0,85

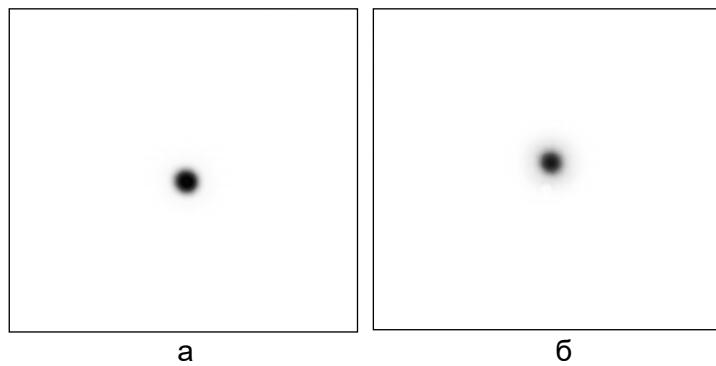


Рис. 4. Изображение объекта при:  $\alpha=0^\circ$  (а);  $\alpha=15^\circ$  (б)

Для объектива РФ-5 качество изображения удовлетворяет требуемым условиям по всему угловому полю  $15^\circ$ .

**Заключение.** В результате экспериментов было установлено, что по критерию симметричности функции распределения облученности в изображении наилучшими aberrационными характеристиками при угловом поле до  $15^\circ$  обладает объектив РФ-5, на основе которого будет проектироваться макет измерительной оптико-электронной системы. Подтверждена эффективность использования соотношений главных моментов функции облученности как меры полевых aberrаций при отборе объективов приемных систем, использующих матричные фотоприемники.

### Литература

1. Vasileva A.V., Vasilev A.S., Konyakhin I.A. Vision-based system for long-term remote monitoring of large civil engineering structures: design, testing, evaluation // Measurement Science and Technology. – 2018. – V. 29. – № 11. – P. 115003.
2. Шубарев В.А. и др. Оптико-электронный преобразователь контроля смещений элементов крупногабаритных конструкций // Вопросы радиоэлектроники. – 2014. – Т. 1. – № 2. – С. 53–62.
3. Mikheev S.V., Konyakhin I.A., Barsukov O.A. Optical-electronic system for real-time structural health monitoring of roofs // Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications IV. – 2016. – V. 9896. – P. 98961C.
4. Konyakhin I.A., Vasilev A.S., Petrochenko A.V. Electrooptic Converter for Measuring Linear Shifts of the Section Boards at the Main Dish of the Radiotelescope // Smart Electromechanical Systems. – 2016. – P. 269–277.
5. Konyakhin I.A. et al. Optic-electronic systems for measuring the angle deformations and line shifts of the reflecting elements at the rotateable radio-telescope // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII. – 2011. – V. 8082. – P. 80823R.
6. Жуков Д.В., Коняхин И.А., Усик А.А. Итерационный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 1. – С. 43–45.

УДК 538.95

УВЕЛИЧЕНИЕ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
СВИНЦОВО-ГАЛОИДНЫХ ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОЧАСТИЦТонкаев П.А.<sup>1</sup>, Зограф Г.П.<sup>1</sup>, Макаров С.В.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. Макаров С.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе теоретически продемонстрировано усиление фотолюминесценции в свинцово-галоидной перовскитной сферической наночастице за счет возбуждения Ми-резонансов. Определена оптимальная интенсивность лазера накачки для увеличения квантовой эффективности люминесценции до ~0,9.

**Ключевые слова:** фотолюминесценция, наночастицы, гибридные перовскиты, нанофотоника, резонансы Ми.

Для современной нанофотоники одним из самых важных элементов являются наноразмерные источники света [1]. На данный момент наиболее часто используются – излучатели на квантовых точках [2] и наночастицы с активными дефектами [3]. Однако сложной задачей остается настройка и управление направлением излучения. Обычные методы решения этой задачи либо требуют значительных затрат и усложнения системы, либо делают систему восприимчивой к внешнему воздействию [4].

Недавно было продемонстрировано, что наночастицы, изготовленные из органо-неорганических перовскитных свинцово-галоидных перовскитов (MAPb(I, Br)<sub>3</sub>), являются хорошими наноантеннами в оптическом диапазоне [5]. Кроме того в этих наноантенных наблюдалось усиление направленного излучения фотолюминесценции за счет поддержания Ми-резонанса. Так же, изменяя соотношение Br и I, можно настроить фотолюминесценцию на весь видимый диапазон [6].

В этой работе теоретически изучена квантовая эффективность фотолюминесценции одиночной наносферы MAPbI<sub>3</sub>. Мы считаем, что это исследование может быть перспективным для различных применений в нанофотонике, например для наноантенны.

Квантовый выход люминесценции определяется отношением числа поглощенных фотонов к излученным. Поглощенные электроны генерируют носители заряда которые могут рекомбинировать излучательно или безызлучательно. В качестве безызлучательных каналов выступают релаксация носителей на дефектах и Оже-рекомбинация. Первый линейно пропорционален плотности сгенерированных носителей, второй – кубически. Радиационная рекомбинация пропорциональна квадрату плотности носителей. Квантовая эффективность определяется балансом этих вкладов.

В работе [7] показано, что относительная скорость излучения диполя, помещенного в диэлектрическую сферу, может быть увеличена за счет собственного Ми резонанса. На рис. 1 представлена рассчитанная согласно модели, относительная скорость излучения света диполем на длине волны 770 нм, помещенным в сферическую наночастицу MAPbI<sub>3</sub>, в зависимости от радиуса. Максимумы соответствуют возбуждениям собственных Ми-мод наносферы при определенных радиусах: MD – магнитный диполь (139 нм), MQ – магнитный квадруполь (203 нм) и MO – магнитный октуполь (264 нм). При возбуждении каждой из этих мод в наносфере электрическое и магнитное поле принимает особую конфигурацию. Первый резонанс для диэлектрической сферической наночастицы – магнитный дипольный резонанс – возникает, когда длина волны внутри частицы сопоставима с диаметром наночастицы. При этом условии поляризация электрического поля антипараллельна на противоположных границах частицы, что приводит к взаимодействию токов смещения

с осцилирующим магнитным полем в центре. При возбуждении этой моды скорость излучения вырастает в полтора раза. Это увеличение приводит к росту константы радиационной рекомбинации, так как ее величина обратно пропорциональна радиационному времени жизни.

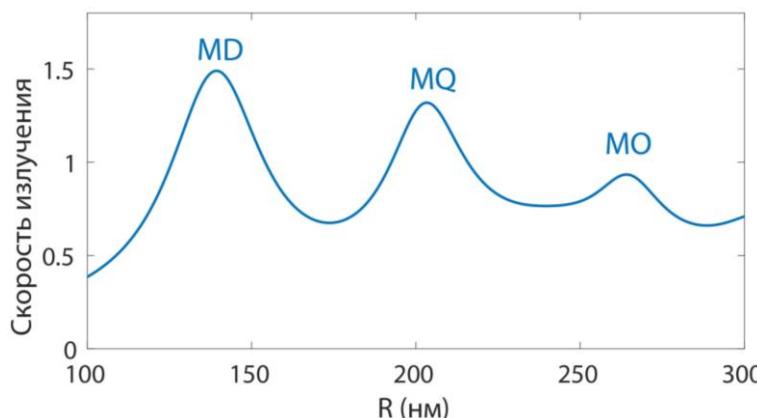


Рис. 1. Относительная скорость излучения наносферы  $\text{MAPbI}_3$  в зависимости от радиуса

Свинцово-галоидные перовскиты имеют достаточно высокий внутренний квантовый выход, однако из-за планарной геометрии большинства исследуемых структур часть сгенерированных фотонов не может покинуть структуру из-за френелевского отражения [8]. Преимуществом сферической геометрии наночастицы является больший коэффициент выхода фотонов, что практически исключает переизлучение внутри структуры. В данной работе мы принимаем значение коэффициента выхода за 1.

Учитывая рекомбинационные эффекты и увеличение скорости излучения в наночастицах описанные выше, кинетическое уравнение для плотности электронно-дырочных пар, генерируемых лазерным излучением, запишется в виде:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\sigma_{abs}}{V\hbar\omega} - AN - F_p BN^2 - CN^3, \quad (1)$$

где  $N$  – плотность носителей заряда;  $I$  – интенсивность света;  $V$  – объем наночастицы;  $\omega$  – частота света;  $\sigma_{abs}$  – сечение поглощения наночастицы;  $F_p$  – относительная скорость излучения;  $A$ ,  $B$  и  $C$  – рекомбинационные константы для объемного материала, соответствующие нерадиационному, радиационному и Оже процессам, соответственно.

Решение уравнения (1) в стационарном случае определяет концентрацию сгенерированных светом носителей заряда  $N$ . Так радиационный процесс описывается членом  $\sim N^2$ , то квантовая эффективность, определяемая как отношение скорости радиационного процесса к остальным, запишется в виде:

$$EQE = \frac{F_p BN^2}{AN + F_p BN^2 + CN^3}. \quad (2)$$

В формуле (2) видно, что квантовый имеет наибольшее значение, когда концентрация носителей не настолько велика, чтобы произошла Оже-рекомбинация, но больше значения, при котором ловушки захвата заполнены. Свинцово-галоидные перовскиты имеют небольшую константу Оже-рекомбинации по сравнению с другими полупроводниками, такими как GaAs например. В тоже время перовскит имеет высокую константу радиационной рекомбинации за счет экситонов при комнатной температуре. В расчетах использованы характерные значения из работы [9].

В соответствии с соотношением (2) была вычислена квантовая эффективность для наносферы  $\text{MAPbI}_3$  в зависимости от ее радиуса и интенсивности лазера накачки с длиной волны 750 нм. Результат представлен на рис. 2. Как видно из рисунка при

небольшой интенсивности лазерного излучения квантовый выход низкий. С ростом интенсивности квантовый выход сначала увеличивается, но при больших интенсивностях снижается, так как генерируется большое количество носителей и преобладает Оже-рекомбинация. Таким образом оптимальной интенсивностью лазера накачки для достижения наибольшего квантового выхода является  $500 \text{ Вт/см}^2$ .

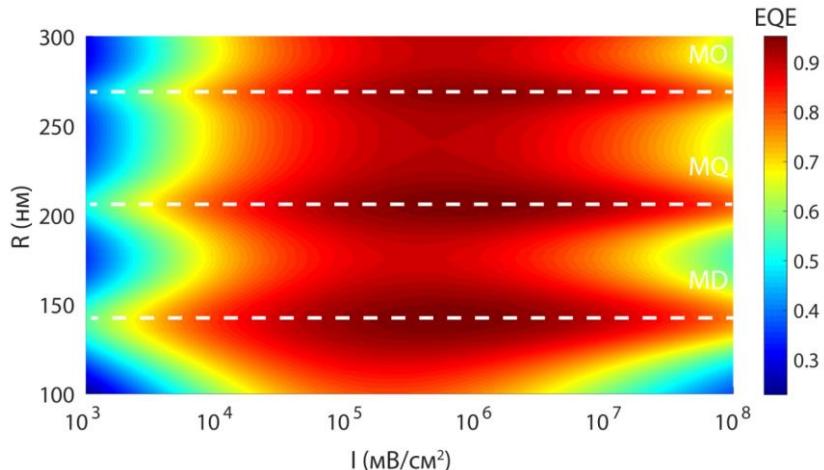


Рис. 2. Квантовая эффективность фотолюминесценции наносферы радиуса  $R$  для разных интенсивностей лазера  $I$ . Белые пунктирные линии – Ми моды излучения

Кроме того, в зависимости от радиуса наночастицы даже при оптимальной интенсивности накачки квантовая эффективность варьируется в диапазоне 0,8–0,95. На рис. 2 радиусы, соответствующие условию возбуждения собственных Ми-мод наносферы, отмечены белыми пунктирными линиями и подписаны названиями мод. Как можно видеть, максимальные значения квантового выхода при фиксированном значении интенсивности накачки наблюдается при радиусе наносферы, удовлетворяющему условия резонанса Ми. При этом максимальное значение квантовой эффективности (0,95) наблюдается при возбуждении моды типа MD.

Таким образом, в работе теоретически показана возможность увеличения квантового выхода люминесценции свинцово-галоидного перовскита до значения ~0,95 при использовании сферической наночастицы радиусом 139 нм. Определена оптимальная интенсивность лазера накачки с длиной волны 750 нм –  $500 \text{ Вт/см}^2$ .

## Литература

1. Tame M.S. et al. Quantum plasmonics // Nature Physics. – 2013. – V. 9. – № 6. – P. 329.
2. Curto A.G. et al. Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna // Science. – 2010. – V. 329. – № 5994. – P. 930–933.
3. Zalogina A.S. et al. Purcell effect in active diamond nanoantennas // Nanoscale. – 2018. – V. 10. – № 18. – P. 8721–8727.
4. Krasnok A.E. et al. All-dielectric optical nanoantennas // Optics Express. – 2012. V. 20. – № 18. – P. 20599–20604.
5. Tiguntseva E.Y. et al. Light-emitting halide perovskite nanoantennas // Nano letters. – 2018. – V. 18. – № 2. – P. 1185–1190.
6. Sutherland B.R., Sargent E.H. Perovskite photonic sources // Nature Photonics. – 2016. – V. 10. – № 5. – P. 295.
7. Chew H. Radiation and lifetimes of atoms inside dielectric particles // Physical Review A. – 1988. – V. 38. – № 7. – P. 3410.
8. Saleh B.E., Teich M.C. Fundamentals of photonics. – New York: Wiley, 2007. – 1177 p.
9. Richter J.M. et al. Enhancing photoluminescence yields in lead halide perovskites by photon recycling and light out-coupling // Nature communications. – 2016. – V. 7. – P. 13941.

УДК 004.932, 535.34, 633.1

**ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОРИЕНТАЦИИ, ВЗАИМНОГО  
РАСПОЛОЖЕНИЯ И ОСВЕЩЕНИЯ ЗЕРЕН ПШЕНИЦЫ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ЕЕ СТЕКЛОВИДНОСТИ**

Трошкін Д.Е.<sup>1</sup>, Горбунова Е.В.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.т.н., доцент Чертов А.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены особенности влияния ориентации, взаимного расположения и освещения зерен пшеницы на определение ее стекловидности на основании анализа цифровых изображений зерен. Выявлена корреляция между увеличением плотности размещения зерна друг относительно друга в зоне анализа и снижением средней интенсивности пикселей цифрового изображения исследуемых объектов, что негативно сказывалось на повторяемости результатов анализа. В качестве решения данной проблемы предложено использовать ИК подсветку. Установлено, что использование ИК источника излучения в качестве подсветки позволит полностью исключить влияние эффекта взаимного расположения зерен друг относительно друга на результаты определения общей стекловидности пробы пшеницы.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, зерно, пшеница, стекловидность.

**Введение.** В настоящее время актуальной задачей является разработка системы контроля качества зерна с использованием метода компьютерного зрения. Одним из самых важных показателей качества является стекловидность. Данный параметр связывает способность зерновки пропускать свет с особенностями строения внутренних тканей, определяющими качество зерна и возможность его использования для тех или иных целей на предприятиях пищевой и зерноперерабатывающей промышленностей. Сама по себе зерновка является сложным объектом для исследования, ее оптические свойства зависят от ориентации в пространстве относительно источника и приемника излучения, а также плотности расположения зерен друг относительно друга. Данная работа посвящена изучению влияния ориентации и взаимного расположения, а также и освещения зерен пшеницы на определение показателя стекловидности исследуемой пробы.

**Стекловидность как показатель качества.** Стекловидность как показатель качества характеризует консистенцию эндосперма и указывает на белковый или крахмалистый характер зерна (рис. 1). Мучнистый эндосперм характеризуется слабой связью крахмальных зерен с белком, а стекловидный – прочной. Разделение зерна по стекловидности в определенном смысле позволяет оценить содержание белка в зерне без проведения химического анализа, существует корреляция между содержанием белка и показателем стекловидности в пределах одной партии, однако данная тенденция не наблюдается при сравнении зерна различных партий, регионов и годов урожая [1].



Показатель стекловидности является одним из показателей, лежащим в основе деления зерна пшеницы на подтипы. Согласно ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия» [2], на продовольственную пшеницу (мягкую и твердую), чем выше стекловидность, тем выше подтип.

**Методика проведения эксперимента.** Исследования проводились с использованием устройства, представленного на рис. 2.

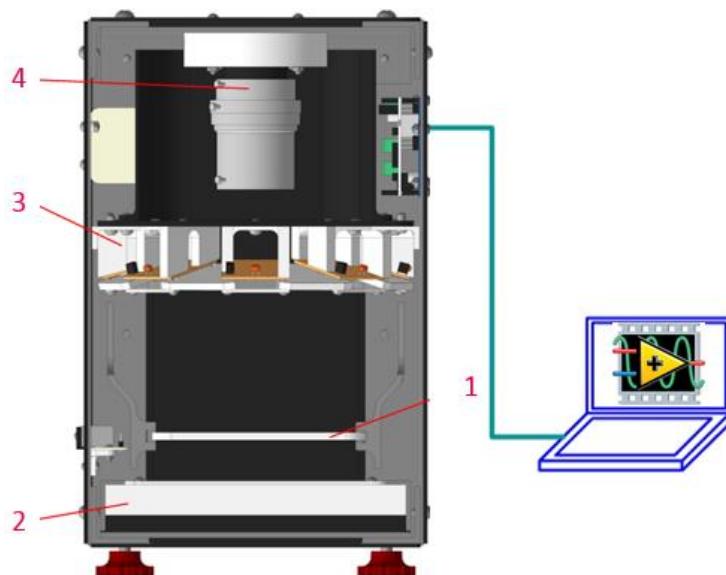


Рис. 2. Схема установки: 1 – светопроницаемая пластина; 2 – модуль нижней подсветки; 3 – модуль верхней подсветки; 4 – узел регистрации

Устройство состоит из двух источников света, верхнего и нижнего, светопроницаемой пластины, телевизионной камеры с объективом, передающей изображения на персональный компьютер. При помощи данного устройства, а также специального программного обеспечения, разработанного для анализа показателя стекловидности на основании цифровых изображений зерен пшеницы, была реализована возможность получения изображений в следующих режимах:

- на отражение (при использовании колориметрической коррекции по белому фону и изображению стандартного эталона белого);
- на пропускание (при реализации завышенной по энергетическим параметрам засветки снизу).

Для проведения экспериментальных исследований использовалась проба пшеницы, отобранная в соответствии с ГОСТ 13586.3-2015 «Зерно. Правила приемки и методы отбора проб» [3]. Серия измерений состояла из 10 опытов с перемешиванием пробы.

Образцы пшеницы размещались на светопроницаемой пластине в один слой, без переналожений, поочередно включались верхний и нижний источники подсветки, получали цифровые изображения анализируемых зерен. После предварительной обработки осуществлялся автоматический подсчет количества объектов на изображении, рассчитывалась средняя интенсивность пикселей каждой зерновки. Полученное значение средней интенсивности сравнивалось с эмпирически установленными пороговыми значениями. В результате сравнения объекты разбивались на три категории: стекловидное, частично-стекловидное и мучнистое зерно. После завершения работы данного алгоритма выполнялся расчет общей стекловидности пробы ( $O_c$ ) по формуле (1) ГОСТ 10987-76 «Зерно. Методы определения стекловидности» [4]:

$$O_c = \Pi_c + \frac{\chi_c}{2}, \quad (1)$$

где  $\Pi_c$  – количество полностью стекловидных зерен, шт.;  $\chi_c$  – количество частично стекловидных зерен, шт.

**Результаты экспериментальных исследований.** Первые два измерения проводились при равномерном расположении зерен в зоне анализа в двух положениях: бороздкой вверх и бороздкой вниз (рис. 3) для минимизации влияния взаимного расположения зерен друг на друга, а также исключения возможных ошибок обнаружения алгоритма сегментации цифровых изображений. Остальные 8 опытов проводились при размещении объектов в зоне анализа случайным образом.

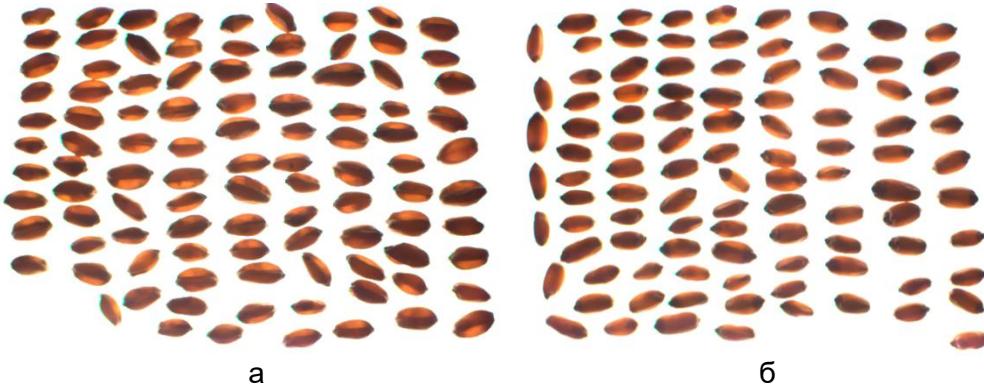


Рис. 3. Цифровые изображения зерен бороздкой вниз (а) и бороздкой вверх (б)

Для выставления адекватных пороговых значений коэффициента пропускания, после окончания измерений зерна разрезались для определения общей стекловидности методом визуального осмотра поперечного среза зерна, согласно ГОСТ 10987-76 [4]. Общая стекловидность пробы составила 70%, данное значение впоследствии принималось за эталонное. Результаты работы алгоритма оценки общей стекловидности пробы пшеницы представлены в табл. 1.

Из анализа полученных результатов следует, что показатель стекловидности практически не зависит от ориентации образцов в пространстве, полученные значения стекловидности зерен, лежащих бороздкой вниз и бороздкой вверх, составили 72% и 70% соответственно. Согласно ГОСТ 10987-76 [4], расхождение между результатами первоначального и повторного или контрольного определения должно быть не более 5% [4], следовательно, полученное расхождение находится в пределах нормы.

Однако анализ остальных цифровых изображений пробы (со случайным расположением зерен в зоне анализа) показал значительный разброс полученных значений показателя общая стекловидность. В некоторых случаях полученное значение общей стекловидности было достаточно близко к эталонному значению, например, измерение 3 (табл. 1), но в других было существенным, как, например, в случае измерений 7 и 10.

Таблица 1. Результаты оценки общей стекловидности пробы пшеницы

№ измерения	стекловидных	частично	мучнистых	общ. стекл., %
1	52	39	9	72
2	51	37	12	70
3	46	39	15	66
4	37	39	24	57
5	33	44	23	55
6	41	36	23	59
7	30	46	24	53
8	41	44	15	63
9	37	40	23	57
10	19	55	26	47

Для нахождения причины данного явления был проведен анализ цифровых изображений № 3–10, по результатам которого выявлена корреляция между плотностью расположения объектов в зоне анализа и снижением определяемого показателя общей стекловидности зерна одной пробы (рис. 4).



Рис. 4. Цифровые изображения № 3 (а) и № 10 (б)

Установлено, что один и тот же образец при отсутствии «соседей» и в случае окружения другими образцами проявляет различную степень «яркости», т. е. снижается интенсивность проходящего через объект оптического излучения от источника, расположенного снизу. Данное явление объясняется уменьшением поступающего светового потока на поверхность зерновки, при близком расположении образцов друг относительно друга, поскольку соседние образцы препятствуют поступлению света от источника на боковые поверхности зерновки, возникает теневая зона, соответственно, измеренная средняя интенсивность объекта на цифровом изображении падает. Это связано, в первую очередь, с тем, что угол излучения использованных в подсветке белых светодиодов составляет  $120^\circ$ . Следовательно, для данной схемы проведения измерений необходим дополнительный механизм компенсации или полного исключения влияния данного эффекта.

В качестве решения выявленной проблемы было предложено использование источника инфракрасного (ИК) излучения в качестве нижней подсветки, поскольку ИК диоды обладают гораздо меньшим значением угла половинной яркости, в данном случае значение угла составляло около  $15^\circ$ .

Был проведен соответствующее экспериментальное исследование. В качестве источника излучения использовался массив ИК диодов. Объектом исследования являлась пробы зерна мягкой краснозерной пшеницы с высоким значением показателя стекловидность. Исследование проводилось по описанной ранее методике, серия опытов состояла из 10 измерений с перемешиванием пробы. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оценки общей стекловидности пробы пшеницы с использованием ИК источника излучения

№ измерения	стекловидных	частично	мучнистых	общ. стекл., %
1	82	12	6	88
2	86	10	4	91
3	83	9	8	87,5
4	84	11	5	89,5
5	80	14	6	87
6	80	15	5	87,5
7	84	10	6	89

№ измерения	стекловидных	частично	мучнистых	общ. стекл., %
8	84	9	7	88,5
9	85	8	7	89
10	83	14	3	90

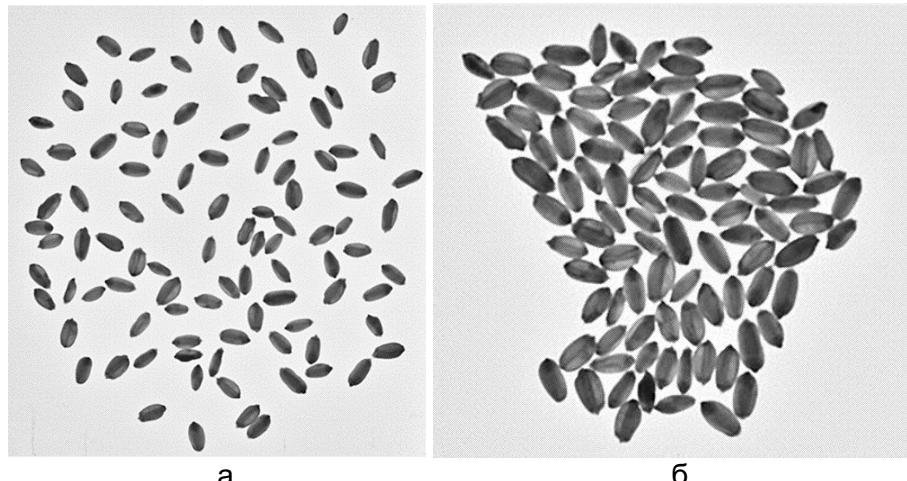


Рис. 5. Цифровые изображения № 6 (а) и № 10 (б), полученные съемкой в ИК диапазоне

Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии корреляции между плотностью расположения объектов и рассчитанным показателем общей стекловидности пробы пшеницы. Для визуального сравнения плотности расположения зерен в зоне анализа на рис. 5 приводятся изображения № 6 и 10.

Оценка повторяемости результатов расчета показателя общей стекловидности алгоритмом проводилась путем расчета СКО, полученное значение составило 1,1. Размах выборки составил 4%, что соответствует требованиям ГОСТ. Таким образом, использование ИК источника излучения в качестве нижнего источника подсветки позволит полностью исключить влияние эффекта взаимного расположения зерен друг относительно друга на результаты оценки общей стекловидности пробы на основании оценки цифровых изображений зерен и обеспечит приемлемую повторяемость результатов, полученных в процессе работы алгоритма оценки стекловидности.

**Заключение.** В работе приведены результаты исследований влияния особенностей ориентации, взаимного расположения и освещения на повторяемость результатов общей стекловидности пробы пшеницы.

Анализ указанных факторов показал, что оптическая анизотропия оказывает сравнительно небольшое влияние на результаты работы алгоритма, разброс значений общей стекловидности при двух противоположных ориентациях зерен в зоне анализа составил 2%, что является приемлемым с точки зрения ГОСТ (разрешен разброс значений повторных измерений до 5%).

Установлено, что взаимное расположение зерен друг относительно друга оказывает существенное влияние на определение показателя общей стекловидности. Полученный в работе показатель стекловидности одной и той же пробы зерна варьировался от 47% до 72%, в зависимости от плотности распределения зерен по зоне анализа. Данный фактор не позволяет обеспечить должную повторяемость результатов при размещении зерен в зоне анализа монослоем без применения дополнительных корректировок.

Был проведен эксперимент с источником ИК излучения, используемым в качестве подсветки. Результаты эксперимента свидетельствуют об отсутствии корреляции между плотностью расположения зерен в зоне анализа и снижением расчетного

значения показателя общей стекловидности пробы. Таким образом, использование ИК источника излучения в качестве подсветки для реализации режима «на пропускание» позволит полностью исключить влияние эффекта взаимного расположения зерен друг относительно друга на результаты оценки общей стекловидности пробы на основании оценки цифровых изображений зерен.

### **Литература**

1. Зверев С.В. Стекловидность как показатель качества зерна пшеницы // Хранение и переработка зерна. – 2017. – № 11(219). – С. 33–34.
2. ГОСТ 9353-2016. Пшеница. Технические условия. – Введен 01.07.2018. – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
3. ГОСТ 13586.3-2015. Зерно. Правила приемки и методы отбора проб. – Введен 01.07.2016. – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
4. ГОСТ 10987-76. Зерно. Методы определения стекловидности. – Введен 01.06.1977. – М.: Стандартинформ, 2009. – 3 с.

УДК 681.7.064.453

## СИНТЕЗ НЕПОЛЯРИЗУЮЩИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ

Фам В.Х.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Губанова Л.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены методики поиска конструкций интерференционных систем, которые обеспечивают малое расхождения между спектральными характеристиками пропускания (отражения) для *s*- и *p*-поляризаций. Слои, входящие в состав неполяризующих интерференционных систем, могут быть изготовлены не только из диэлектрических пленкообразующих материалов, но и из комбинации диэлектриков и металлов. Анализ спектральных характеристик отражения полученных конструкций показывает, что разница между интегральными коэффициентами отражения для *s*- и *p*-поляризаций не превышает 2% в рассматриваемом диапазоне спектра.

**Ключевые слова:** неполяризующие интерференционные системы, поляризация, спектральная характеристика, светофильтры, четвертьволновая оптическая толщина.

**Введение.** В оптических системах нередко встречаются элементы, которые работают под некоторым углом относительно падающего излучения. В результате явления поляризации прошедшее (отраженное) излучение разделяется на две компоненты: *s*- и *p*-поляризация. Однако, в ряде случаев это явление оказывается негативным [1]. Например, во многих интерферометрах необходимо только деление интенсивности светового потока, при этом деление на *s*- и *p*-компоненты нежелательно [2]. Это приводит к задаче поиска конструкций интерференционных систем, которые обеспечивают малое расхождения между спектральными характеристиками пропускания (отражения) для *s*- и *p*-поляризаций.

В настоящее время существуют два основных способа решения задачи обеспечения малого расхождения между двумя поляризациями. Первый способ основывается на использовании конструкций покрытий, в состав которых входят слои, изготовленные только из диэлектрических пленкообразующих материалов [3]. Второй способ основан на построении конструкций, состоящих как из диэлектрических, так и из металлических слоев [4]. Недостатком существующих методик поиска конструкций неполяризующих интерференционных систем, представленных в литературе, является либо полученные конструкции, которые не могут обеспечивать малое расхождение между поляризациями в широком диапазоне спектра, либо полученные конструкции состоят из большого количества интерференционных слоев не равной толщины. В данной работе рассматриваются разработанные методики построения неполяризующих интерференционных систем, имеющие более простую конструкцию, когда в состав покрытия входят небольшое количество слоев, причем диэлектрические слои имеют оптическую толщину, кратную четверти длины волны, металлические слои имеют геометрическую толщину, равную друг другу.

**Постановка задачи и ход ее решения.** Рассматриваемые интерференционные системы состоят из *N* слоев, оптические толщины которых равны (кратны) четверти длины волны. Каждый слой изготавливается из пленкообразующего материала, имеющего показатель преломления *n<sub>j</sub>* (*j*=1, 2, ..., *N*). Среды, содержащие падающее и прошедшее излучения, имеют показатель преломления *n<sub>0</sub>* и *n<sub>m</sub>*, соответственно. Система работает под углом  $\alpha_0$  относительно падающего луча.

Задачей исследования стало определение конструкции интерференционного покрытия, которое обеспечивает минимальное различие между поляризациями.

Для решения этой задачи необходимо рассмотреть энергетический коэффициент пропускания (отражения) как функцию показателей преломления материалов, из

которых формируются слои, при ограничении остальных параметров системы  $T_{s,p}=f(n_{s,p})$ . Используя условие отсутствия поляризации  $T_s=T_p$  определим соотношение между показателями преломления материалов, из которого можно выбрать необходимые параметры неполяризующих интерференционных систем.

**Результаты.** В работе рассмотрены два вида неполяризующих интерференционных систем. В первом случае интерференционные системы содержат только диэлектрические слои, изготовленные из разного количества пленкообразующих материалов. При ограничении оптической толщины (четвертьволновые слои) коэффициент пропускания зависит от показателей преломления материалов, формирующих слои, а так же определяется тем, четное или нечетное количество слоев входит в ее состав. В результате расчетов получено соотношение между показателями преломления материалов, из которых изготавливаются слои. Из этого соотношения можно определить значения показателей преломления пленкообразующих материалов, которые обеспечивают малое расхождение между двумя поляризациями. На основе этого соотношения можно создать методики поиска конструкций неполяризующих интерференционных систем, изготовленных из двух, трех или четырех пленкообразующих материалов. В случае, когда количество слоев является нечетным, это соотношение можно представлять в виде:

$$(\Delta n_0 \cdot \Delta n_m)^{1/2} \cdot (\Delta n_2 \cdot \Delta n_4 \cdot \Delta n_6 \cdots \Delta n_{2k}) = \Delta n_1 \cdot \Delta n_3 \cdot \Delta n_5 \cdots \Delta n_{2k+1}, \quad (1)$$

а в случае, когда количество слоев является четным, в следующем виде:

$$(\Delta n_0 / \Delta n_m)^{1/2} \cdot (\Delta n_2 \cdot \Delta n_4 \cdot \Delta n_6 \cdots \Delta n_{2k}) = \Delta n_1 \cdot \Delta n_3 \cdot \Delta n_5 \cdots \Delta n_{2k-1}, \quad (2)$$

где величина  $\Delta n_j$  определяется отношением показателя преломления  $j$ -ого слоя для  $s$ -поляризации к показателю преломления данного слоя для  $p$ -поляризации:

$$\Delta n_j = n_{js} / n_{jp} = \left[ 1 - \left( n_0 \sin \alpha_0 / n_j \right)^2 \right]^{-1}. \quad (3)$$

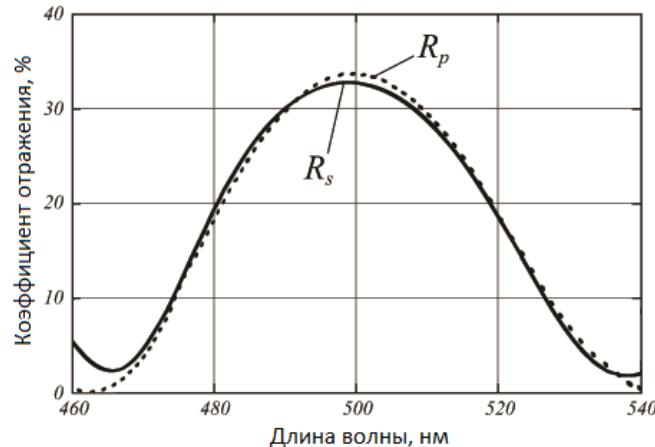


Рис. 1. Спектральные характеристики интерференционной системы Воздух|(HCBC)<sup>6</sup>H|K8 для  $s$ - и  $p$ -поляризаций,  $n_H=1,38$ ,  $n_C=1,72$ ,  $n_B=2,35$ ,  $\lambda_0=500$  нм,  $\alpha_0=45^\circ$

Спектральные характеристики коэффициента отражения интерференционной системы, построенной на основе представленной методики, показаны на рис. 1. Из этого рисунка видно, что расхождение между спектральными характеристиками для  $s$ - и  $p$ -поляризаций энергетического коэффициента отражения достаточно незначительное в рассматриваемом диапазоне спектра. Разница между интегральными коэффициентами отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций составляет 0,14% в диапазоне длин волн 460–540 нм.

Другим видом неполяризующих интерференционных систем является металло-диэлектрические системы. Это системы, в состав которых входят как слои, изготовленные из диэлектрических материалов, так и слои, изготовленные из металлических материалов. В работе приведена методика выбора металла, из которого может быть изготовлен один или несколько слоев. Наличие не любого металлического слоя в структуре покрытия может обеспечить малое расхождение между спектральными характеристиками энергетического коэффициента отражения (пропускания) для *s*- и *p*-поляризаций. Анализ зависимости коэффициентов отражения  $R_s$  и  $R_p$  от угла падения излучения показывает, что для получения малого расхождения между поляризациями величина минимального коэффициента отражения  $R_{pmin}$  для *p*-поляризации должна иметь достаточно большое значение. В результате расчетов величина  $R_{pmin}$  имеет вид:

$$R_{pmin} = \left[ (k/n) \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + (k/n)^2} \right)^{-1} \right]^2. \quad (4)$$

Анализ этой зависимости показал, что для обеспечения малого расхождения необходимо выбрать металлы, которые имеют коэффициент поглощения  $k$  намного больше его показателя преломления  $n$ , такие как, серебро, алюминий и магний.

Определение значения геометрической толщины металлических слоев выполняется графическим способом. На основе распределения коэффициентов отражения для *s*- и *p*-поляризаций в зависимости от длины волны и геометрической толщины металлических слоев можно определить зоны, в которых значения коэффициентов отражения будут приблизительно равными. При фиксировании значения длины волны можно определить значение геометрической толщины металлических слоев, при котором энергетические коэффициенты отражения *s*- и *p*-поляризаций равны друг другу.

На рис. 2 представлены спектральные характеристики коэффициента отражения полученной интерференционной системы для *s*- и *p*-поляризаций. Из рис. 2 видно, что в диапазоне длин волн 460–580 нм расхождение между двумя поляризациями является достаточно малым. В данном диапазоне спектра разница между интегральными коэффициентами отражения для *s*-и *p*-поляризаций составляет 0,05%.

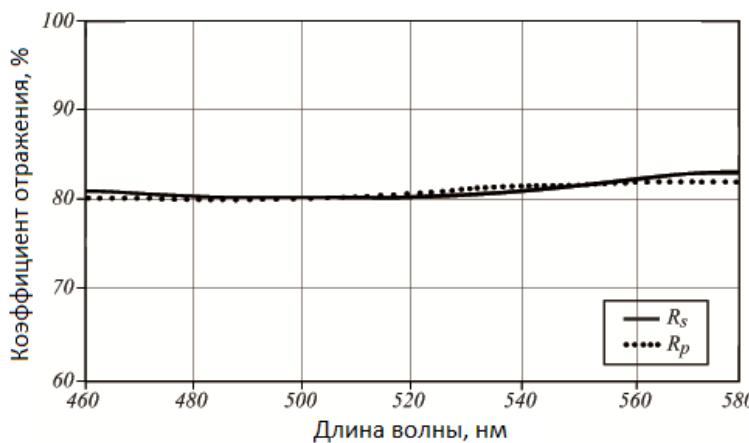


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициентов отражения интерференционной системы воздух|(MgF<sub>2</sub>|Ag|ZnS)<sup>6</sup>|K8 для *s*- и *p*-поляризаций при угле падения излучения 45°

Сравнение спектральных характеристик отражения двух видов неполяризующих интерференционных систем показывает, что металло-диэлектрические системы позволяют обеспечивать малое расхождение между двумя поляризациями в более широком диапазоне спектра, чем системы, в состав которых входят только диэлектрические слои.

**Заключение.** В работе рассмотрены методики построения конструкций диэлектрических неполяризующих интерференционных покрытий, изготовленных из разного количества пленкообразующих материалов. С увеличением количества пленкообразующих материалов, используемых для формирования слоев, повышается возможность получения минимальной разницы между интегральными коэффициентами отражения для *s*- и *p*-поляризаций. Определены соотношения между показателями преломления слоев, формирующих интерференционную систему, которые обеспечивают малое расхождения между спектральными характеристиками энергетического коэффициента отражения (пропускания) для *s*- и *p*-поляризаций. Также рассмотрена методика поиска конструкций неполяризующих интерференционных покрытий, в состав которых входят слои, изготовленные из металлических материалов. Представлена методика выбора металла, из которого выполнены один или несколько слоев, позволяющая обеспечивать малое расхождение между двумя поляризациями.

Конструкции покрытий, построенные на основе приведенных методик, являются достаточно простыми в реализации из-за небольшого количества слоев, причем оптические толщины диэлектрических слоев равны (кратны) четверти длины волны и геометрические толщины металлических слоев равны между собой.

### **Литература**

1. Baumeister P.W. Optical coating technology // Optimization. – 2004. – V. 10. – P. 7.
2. Macleod A.H. Thin-Film Optical Filters. – Fourth Edition. – A.H. Macleod–USA: CRC Press, 2010. – 800 p.
3. Wang W., Xiong S., Zhang Y. Design and analysis of all-dielectric broadband nonpolarizing parallel-plate beam splitters // Applied optics. – 2007. – V. 46. – № 16. – P. 3185–3188.
4. Shi J.H., Guan C.Y., Wang Z.P. Design and analysis of metal-dielectric nonpolarizing beam splitters in a glass cube // Applied optics. – 2009. – V. 48. – № 18. – P. 3385–3390.

УДК 681.78

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЭКСПОЗИЦИИ  
И ЧАСТОТЫ КАДРОВ НА СУММАРНУЮ ПОГРЕШНОСТЬ КОНТРОЛЯ  
ПОЛОЖЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ  
СИСТЕМОЙ СО КОНТРОЛЬНЫМИ МАРКАМИ**

Фам Н.Т.<sup>1</sup>, Хоанг А.Ф.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.т.н., ст.н.с. Тимофеев А.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

Представлены результаты исследований по влиянию составляющих погрешностей на точность контроля положения движущихся элементов механизмов при применении оптико-электронной системы с контрольными марками. Показано, что наиболее сильное влияние при различных скоростях перемещения элементов оказывают нестабильности времени экспозиции и вариации межкадрового времени фотоприемного матричного поля.

**Ключевые слова:** контроль перемещения, оптико-электронная система, динамическая погрешность, реперная метка, анализ изображений.

В условиях развития сложного промышленного и технологического оборудования оптико-электронные системы с контрольными марками находят более широкое применение в строительстве [1, 2], железнодорожном транспорте [3], и машиностроении [4, 5].

В научно-исследовательской лаборатории оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО разрабатываются различные оптико-электронные системы на основе бесконтактных методов определения текущего положения движущихся элементов различных механизмов. Одной из последних разработок является система контроля положения элементов механизмов при их циклическом линейном перемещении (ОЭСИЛП), использующие анализ совокупности цифровых изображений от различного вида отражателя, получаемых на фотоприемном матричном поле [6].

Обобщенная структура ОЭСИЛП представляется устройством видео захвата (УВЗ) (рис. 1), контрольными марками (КМ) в виде отражающей сферы, системой подсветки (СП), модулем обработки видеинформации (МОВИ) и устройством визуализации (УВ).

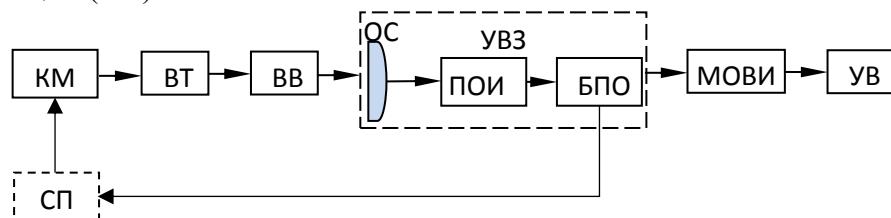


Рис. 1. Обобщенная схема системы ОЭСИЛП

При работе системы цифровое изображение источников СП от КМ, сформированные оптической системой (ОС) с помощью матричного приемника оптического излучения (ПОИ), и блоков предварительной обработки (БПО) и МОВИ преобразуется в форму удобную для дальнейшего использования и УВ. Влияние внешних воздействий (ВВ) воздушного тракта среды (ВТ) различной природы (изменение температуры, пропускания среды и прочие возможные фоновые помехи), также как параметры аппаратных и проигранных средств влияют на суммарную погрешность определения текущих координат перемещающегося элемента [7].

Погрешности ОЭСИЛП, обусловленные: внутренними шумами ПОИ  $\delta x_0^{\text{ПОИ}}$ ; неточностью задания дистанции до КМ  $\delta x_o^{\text{зад}}$ ; неточностью задания фокусного расстояния объектива  $\delta x_o^{\text{фок}}$ ; погрешность задания радиуса отражателя КМ  $\delta x_o^R$  и

эксплуатационные погрешности, обусловленные температурной деформацией корпуса  $\delta x_0^{\Delta T}$  были рассмотрены в [3–6], в то время как вариациями времени экспозиции ПОИ  $\delta x_0^{\text{exp}}$  и вариацией межкадрового времени съема информации с ПОИ  $\delta x_0^{f_{\text{кадр}}}$  не достаточно исследованы.

Поэтому целью настоящего исследования является оценка степени влияния вариацией времени экспозиции ПОИ  $\delta x_0^{\text{exp}}$  и вариацией межкадрового времени съема информации с ПОИ  $\delta x_0^{f_{\text{кадр}}}$ , которые в конечном итоге обусловлены смазом цифровых изображений [2–4].

Появление «смазы» приводит к уменьшению эффективной облученности  $E_{\text{эфф}}$  по сравнению с облученностью ПОИ  $E_{\text{max}}$  для статичного положения КМ в  $k_b$  раз [3].

$$k_b = \pi d_{\text{КМ}} / (4Vt_{\text{эксп}} + \pi d_{\text{КМ}}), \quad (1)$$

где  $d_{\text{КМ}}$  – размер контрольной марки;  $V$  – скорость перемещения объекта, связанной с ним КМ;  $t_{\text{эксп}}$  – время экспозиции в ПОИ.

Ослабления влияния смазы предложен способ компенсации воздействия движения объекта изменениями относительного отверстия  $D_{\text{вх}}$  ОС и времени экспозиции  $t_{\text{эксп}}$ :

$$D_{\text{вх}} = \sqrt{\frac{E_{\text{нас}}(x, y) f'^2 (4Vt_{\text{эксп}} / \pi d_{\text{КМ}} + 1)}{\pi \tau_o(\lambda) L_{e\lambda}(x, y)}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{нас}}(x, y)$  – облученность насыщения ПОИ;  $f'$  – фокусное расстояние объектива ОС;  $L_{e\lambda}(x, y)$  – энергическая яркость РМ.

В случае при движении КМ со скоростью  $V$ , с учетом законов геометрической оптики и использовании алгоритмов определения энергетического центра изображения КМ [7, 8], погрешность определения координаты КМ от времени экспозиции  $\delta x_0^{\text{exp}}$  предложено определять выражением

$$\delta x_0^{\text{exp}} = [V / 2 \left( \frac{z_0}{f'} - \frac{z_0 + R/2}{z_0 + R} \right)] \Delta T t_{\text{эксп}} \cdot k_t, \quad (3)$$

где  $f''$  – заднее фокусное расстояние ОС;  $R$  – радиус отражающей поверхности;  $z_0$  – дистанции до марки;  $k_t$  – поправочные коэффициенты изменения выходных характеристик цифрово-аналогового преобразователя при изменении температуры на  $\Delta T$ .

Нестабильность времени экспозиции практически обеспечивается генератором частоты, определяющим все временные преобразования в цифровых компьютерных системах. Относительное изменение частоты с кварцевым стабилизатором частоты, как правило, не превышает  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  [9] при изменении температуры от 0 до  $+50^{\circ}\text{C}$ , тогда нетрудно заметить, что и коэффициент  $k_t$  будет равен указанной величине.

Исследование зависимости средней квадратической погрешности определения координат КМ  $\delta x_0^{\text{exp}}$  от дистанции до КМ при вариациях экспозиции, обусловленной временной нестабильностью частоты генератора ( $10^{-4}$ ) при обработке информации показало, что ее величина существенно увеличивается с дистанцией до КМ и также возрастает с уменьшением частоты кадров (рис. 2, а). Величина погрешности определения координат КМ от нестабильности частоты кадров  $\delta x_0^{f_{\text{кадр}}}$  в предложенном алгоритме определения координат КМ при определении мгновенной скорости  $V$  по величине разности положения изображения КМ  $x'_1$  и  $x'_2$  в последовательных кадрах,

отнесенное ко времени между кадрами  $t_{\text{кадр}}$  (обусловлено частотой кадров  $f_{\text{кадр}}$ ) в первом приближении можно записать

$$\delta x_0^{f_{\text{кадр}}} = [t_{\text{эксп}} V / 2t_{\text{кадр}} (\frac{z_0}{f'} - \frac{z_0 + R/2}{z_0 + R})] \delta t_{\text{кадр}}. \quad (4)$$

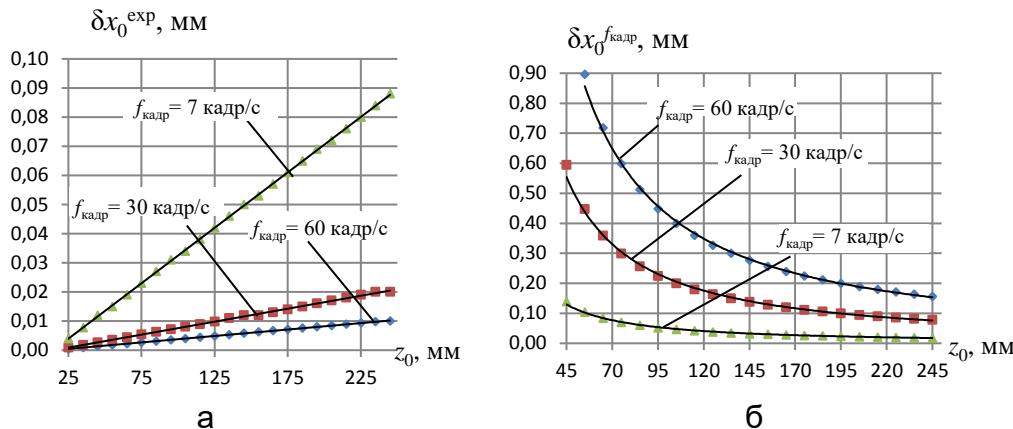


Рис. 2. Зависимости средней квадратической погрешности определения координат КМ от дистанции до КМ при вариациях экспозиции  $\delta x_0^{\text{exp}}$  (а) и при вариациях частоты кадров  $\delta x_0^{f_{\text{кадр}}}$  (б), обусловленной временной нестабильностью частоты генератора ( $10^{-4}$ ) при различных частотах кадров (для  $f''=5$  мм,  $x_0=10$  мм,  $t_{\text{эксп}}=0,8t_{\text{кадр}}$  и скорости перемещения КМ  $V=5$  мм/с)

Исследование зависимости средней квадратической погрешности определения координат КМ  $\delta x_0^{f_{\text{кадр}}}$  от дистанции до КМ при вариациях частоты кадров, обусловленной временной нестабильностью частоты генератора ( $10^{-4}$ ) обработки информации для различных частот кадров, показало, что ее величина существенно уменьшается с дистанцией до КМ, в то время как она увеличивается с увеличением частоты кадров (рис. 2, б).

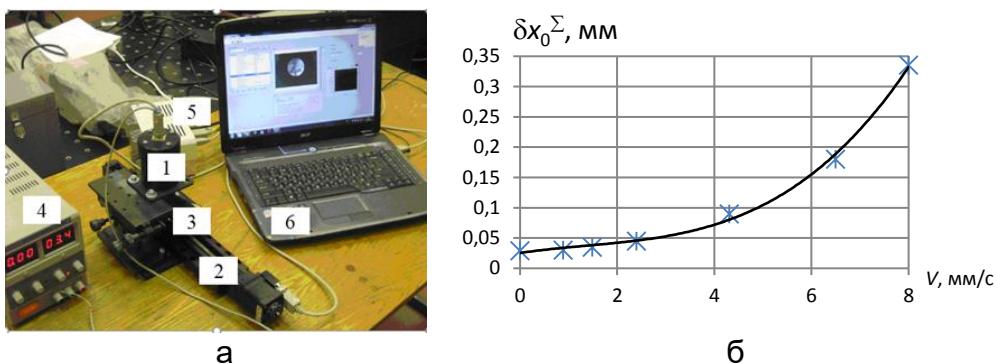


Рис. 3. Общий вид элементов ОЭСИЛП (а) и экспериментальное значение зависимости СКО контроля смещений  $x$  от скорости движения КМ  $V$  (б)

При комплексных экспериментальных исследованиях характеристик разработанного образца ОЭСИЛП (рис. 3, а) на стенде ВКА им. А.Ф. Можайского для испытания пневмоуправляемых клапанов типа Р96.349.01.000, Р96.261.01.000, Р96.139.01.000 (смещение, скорость и ускорение) показано, что в статике отклонения от линейности некомпенсированной статической характеристики для измерений со сферическим отражателем не превышают 1,66 пикселя, в то время как среднеквадратичное значение меньше 0,15 пикселя, что подтверждает то, что случайная погрешность измерений сдвига не превышает 0,01 мм, а в динамике при изменении

скорости перемещения КМ от 0,5 мм/с до 8 мм/с среднеквадратичное значение изменялось от 0,03 мм до 0,35 мм (рис. 3, б), что подтверждает необходимость компенсировать величину смазы изображений в зависимости от скорости перемещения.

Исследования показали:

- ослабление влияния смазы возможно путем компенсации цифрового изображения движущегося объекта за счет регулировки относительного отверстия объектива ОС или времени экспозиции в зависимости от скорости перемещения;
- наиболее сильное влияние на работы оптико-электронных систем с контрольным элементом в виде отражающего шарика по степени убывания оказывают эксплуатационные погрешности от вариации межкадрового времени съема информации с ПОИ и времени экспозиции.

Дальнейшие исследования планируются продолжить в направлении совершенствования алгоритмов обработки цифровых изображений структурированных активных меток в оптико-электронных системах контроля положения железнодорожного пути [8, 10, 11].

## Литература

1. Якушенков Ю.Г. Основы оптико-электронного приборостроения: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2013. – 376 с.
2. Шубарев В.А. и др. Оптико-электронный преобразователь контроля смещений элементов крупногабаритных конструкций // Вопросы радиоэлектроники. – 2014. – Т. 1. – № 2. – С. 53–62.
3. Фам Н.Т, Пантиюшина Е.Н., Тимофеев А.Н., Васильев А.С., Динь Б.М. Влияние скорости движения оптико-электронной системы на погрешность контроля положения железнодорожного пути // Изв. вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 9. – С. 814–822.
4. Горбачев А.А., Коротаев В.В., Пантиюшина Е.Н. Оптико-электронная система для контроля положения поршня в клапане // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. – № 11. – С. 29–32.
5. Фам Н., Тимофеев А.Н., Васильев А.С. Исследование погрешностей контроля положения движущихся элементов оптико-электронной системой со сферическим отражателем // XIII Международная конференция «Прикладная оптика-2018»: сборник трудов конференции. – 2018. – Т. 2. – С. 160–164.
6. Горбачев А.А., Коротаев В.В., Пантиюшина Е.Н. Оптико-электронная система для контроля положения поршня в клапане // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. – № 11. – С. 29–32.
7. Serikova M.G., Pantyushina E.N., Zyuzin V.V., Korotaev V.V., Rodrigues J.J. Accurate invariant pattern recognition for perspective camera model // Proceedings of SPIE. – 2015. – V. 9530. – Р. 95300O.
8. Горбачев А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе: учебное пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 98 с.
9. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
10. Андреев А.Л., Коротаев В.В. Особенности расчета оптико-электронных систем позиционирования на основе готовых телевизионных модулей // Приборостроение. – 2010. – № 10. – С. 69–75.
11. Sycheva E.A. et al. Active marks structure optimization for optical-electronic systems of spatial position control of industrial objects // Modeling Aspects in Optical Metrology VI. – 2017. – V. 10330. – Р. 103301Н.

УДК 629.052.4

## АВТОМАТИЗАЦИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Фомин Д.И.<sup>1</sup>Научный руководитель – ассистент Мараев А.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В данной работе будут рассмотрены существующие методы автоматического управления квадрокоптерами возможность использования фазовых дальномеров в системах управления посадкой и обнаружения препятствий на таких беспилотных летательных аппаратах.

**Ключевые слова:** квадрокоптеры, автоматизация, дальномеры, управление, посадка, обнаружение препятствий.

**Введение.** Все большую популярность получают беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в виде многовинтовых устройств, а чаще – квадрокоптеров, представляющих из себя платформу с четырьмя роторами, одна пара которых вращается по часовой стрелке, другая – против. Для автономной работы БПЛА необходима система обнаружения препятствий на пути их следования, а также система самостоятельной посадки. Обе эти системы могут быть реализованы на основе фазовых дальномеров.

**Существующие методы управления.** Для организации автономного полета на данный момент в основном применяются видеокамеры [1], а для управления высотой используются барометры [2] или ультразвуковые датчики [3].

Метод позиционирования с использованием видеокамеры, имеет высокую точность в помещениях и на небольших (до 10 м) высотах, но не работает в слишком темных (освещенность от 6 лк до 15 лк) так и в условиях засветки (в лк). Так же такие датчики не работают над прозрачной поверхностью и поверхностью без четких контуров.

Принцип работы барометров основан на изменении давления с увеличением высоты. Таким датчикам свойственна высокая погрешность как вследствие слабого изменения атмосферного давления с высотой, так и вследствие случайных изменений давления из-за погодных условий.

Ультразвуковые датчики широко применяются в малых дронах, которые применяются в помещениях. Такие датчики работают на небольших высотах (до 10 м) и неприменимы над звукопоглощающими поверхностями.

**Принципы действия дальномеров.** Дальномерные приспособления делятся на активные и пассивные. Активные дальномеры подразделяются на звуковые и оптические, а в пассивных дальномерах используется метод сравнения с образцом, для определения масштаба, или они могут работать на принципе параллакса.

Активные дальномеры также делятся на временной и фазовый. Принцип действия дальномеров временного типа состоит в измерении времени, которое затрачивает посланный дальномером сигнал для прохождения расстояния до объекта и обратно. Скорость распространения сигнала (скорость света или звука) считается известной.

Принцип действия фазового дальномера заключается в том, что источник работает постоянно, но его излучение амплитудно модулируется сигналом определенной частоты так, чтобы длина волны ( $L$ ) (рис. 1) в зависимости от необходимого расстояния увеличивалась или уменьшалась во времени [4].



Рис. 1. Принцип действия фазового дальномера

Отраженное от объекта излучение принимается фотоприемником, и его фаза сравнивается с фазой опорного сигнала. Наличие задержки при распространении волны создает сдвиг фаз, который и измеряется дальномером. Расстояние определяется по формуле

$$D = \frac{c}{2f} \frac{\phi}{2\pi}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света;  $f$  – частота модуляции лазера;  $\phi$  – фазовый сдвиг.

**Применение дальномеров для беспилотных летательных аппаратов.** Для автономной работы БПЛА необходима система обнаружения препятствий на пути их следования, а также система самостоятельной посадки. Обе эти системы могут быть реализованы на основе фазовых дальномеров. Для обнаружения препятствий излучение должно быть промодулировано по амплитуде на расстояние, необходимое для изменения направления движения, и зависит от скорости полета и маневренности дрона.

Высота, при которой автоматически управляемый квадрокоптер начинает маневр точной посадки обычно оценивается высотой около 2 м, значит, при посадке период модуляции должен соответствовать этому расстоянию.

**Система управления.** Для системы управления необходимо несколько источников, направленных в разные стороны, для облета препятствий. С увеличением числа дальномеров, очевидно, уменьшаются размеры слепых зон (рис. 2).



Рис. 2. Расположения дальномеров на квадрокоптере

Каждый дальномер показывает расстояние от дрона до препятствия или не получает обратный сигнал, т.е. в этом направлении нет препятствий в зоне действия дальномера. При обнаружении препятствия в направлении следования сигнал передается на блок управления БПЛА, который в свою очередь изменяет направление движения, в зависимости от заданного курса и информации с остальных датчиков расстояния.

**Система посадки.** Для работы системы посадки необходимо и достаточно четырех основных и одного вспомогательного дальномера. Вспомогательный дальномер, излучение которого промодулированный по амплитуде на максимальную дальность нужен только для активации системы точной посадки, при снижении высоты до заданного значения (рис. 3).



Рис. 3. Расположение датчиков посадки

После активации системы посадки четыре датчика расстояния, находящиеся на самых удаленных от центра дрона частях, не просто измеряют расстояния до поверхности, они сравнивают сдвиги фаз каждого дальномера и в зависимости от этого увеличивают или уменьшают мощность каждого из двигателей. Таким образом в каждый момент времени аппарат будет направлен параллельно поверхности.

**Заключение.** В данной работе были приведены системы управления и посадки на основе оптических дальномеров. Система посадки при помощи оптических дальномеров имеет явное преимущество над посадкой по уровню, так как может быть применима на неровных участках поверхности и на склонах.

Система управления может быть усовершенствована для взаимодействия комплекса БПЛА. Для этого нужно решить две проблемы:

1. система должна отличать препятствия от тех БПЛА, вместе с которыми они работают;
2. система слежения за летательными аппаратами, так как дальномеры направлены в одном направлении относительно дрона, а сами БПЛА могут перемещаться относительно друг друга.

## Литература

1. Любич Л.Я., Сотникова М.В. Управление посадкой квадрокоптера на движущееся основание. – СПб.: СПбГУ, 2016. – 36 с.
2. Датчики удержания высоты дрона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mirquadrocopterov.ru/> (дата обращения: 22.01.2019).
3. Петров В.Ф., Барунин А.А., Терентьев А.И. Модель системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2014. – № 12. – С. 217–225.
4. Принцип работы фазового дальномера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.laser-portal.ru> (дата обращения: 20.01.2019).

УДК 535.417, 535.317, 778.38

**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТА НА ГЛУБИНУ РЕЗКОСТИ  
ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ  
СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ ФРЕНЕЛЯ**

Фролова М.А.<sup>1</sup>Научный руководитель – д.т.н., профессор Корешев С.Н.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

Приведены результаты исследования влияния распределения фазы в пространстве предметов на глубину резкости синтезированных голограмм. Работа выполнена методом математического моделирования реальных физических процессов синтеза и восстановления голограмм бинарных транспарантов. Установлена возможность существенного, доходящего до нескольких раз, глубины резкости восстановленного изображения за счет представления объектной волны при синтезе голограммы в виде суперпозиции объектных волн, исходящих от двух одинаковых объектов, расположенных на различных, строго фиксированных, расстояниях от плоскости синтеза голограммы.

**Ключевые слова:** голограмма, глубина резкости, разность фаз, синтезированная голограмма.

**Введение.** Использование принципа голографии в проекционной фотолитографии обусловлена, в первую очередь возможностью одновременного безаберрационного формирования больших по площади действительных изображений, в том числе и изображений бинарных двумерных транспарантов – фотошаблонов [1, 2]. Использование голограмм в проекционной фотолитографии позволяет обойтись без применения сложных оптических систем, конструкция которых постоянно усложняется по мере ужесточения требований к качеству изображения, формируемого с помощью фотолитографического объектива. В частности, существующая тенденция к уменьшению размеров электронных приборов приводит к необходимости постепенного увеличения разрешающей способности оптических систем. Как правило, это достигается с помощью уменьшения рабочей длины волны, что, в свою очередь, приводит к уменьшению размеров участка изображения, свободного от аберраций.

**Глубина резкости.** Изображение считается резким в пределах такого смещения плоскости наблюдения, при котором диаметр изображения точечного объекта, представляемого в виде геометрической точки, не превышает диаметра центрального кружка картины Эйри. Выражение, позволяющее определить глубину резкости оптической системы в соответствии с этим критерием, имеет вид [3]

$$|b| = \pm \frac{\lambda n}{2A^2}, \quad (1)$$

где  $A$  – числовая апертура системы;  $\lambda$  – длина волны используемого излучения;  $n$  – показатель преломления среды (в случае воздуха  $n=1$ ).

В свою очередь, числовая апертура излучения, дифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры объекта – пикселе, имеющем размер  $a_t$ , будет описываться выражением:

$$A = n \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_t}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – апertureный угол дифрагировавшего излучения.

Из выражений (1) и (2) следует, что на глубину резкости оказывают влияние только рабочая длина волны  $\lambda$  и размер одного пикселя  $a_t$ .

В настоящее время известны различные методы, позволяющие дополнительно увеличить глубину резкости изображений. Один из них основан на представлении при синтезе голограммы-проектора объектной волны в виде суперпозиции нескольких

объектных волн, порожденных одним и тем же объектом – фотошаблоном, располагаемым на различных расстояниях от голограммы [4].

Практическая реализация синтеза подобной голограммы, как указывалось выше, требует представления объектного пучка в виде суперпозиции двух или более, объектных волн, формируемых одинаковыми объектами. При физической регистрации голограммы такая операция требовала бы очень точной установки объектов, но ее нетрудно реализовать при условии синтеза в виртуальном пространстве. Наличие расстояния между плоскими объектами приводит к возникновению определенной разности фаз между объектными волнами, которая, очевидно, будет влиять на регистрируемую голограммную структуру, а через нее – на итоговое распределение интенсивности в восстановленном изображении и, соответственно, глубину резкости. При этом восстановленное изображение будет иметь наилучшее качество при достижении полной синфазности объектных пучков.

Данная оценка практически полностью соответствует приведенным в работе [4] результатам расчета распределения фазы в восстанавливаемом изображении. Из нее следует, что при небольших значениях расстояния между объектами  $\Delta$  главным, влияющим на распределение фазы в плоскости синтеза голограммы, фактором становится положение точки на голограмме относительно ее оси. В то же время, по мере увеличения  $\Delta$  влияние положения точки постепенно падает и основным фактором, влияющим на разность фаз, становится само расстояние между источниками света.

Другим, не менее значимым, фактором является сама дискретизация. Ограниченный размер дискретных ячеек плоскости голограммы, приводит к тому, что значение комплексной амплитуды, рассчитанное, по идее, в конкретной точке, фактически устанавливается сразу для всего пикселя. Это влечет за собой неопределенность и, как следствие – рост различия между регистрируемыми значениями фазы и комплексной амплитуды и реального значения по мере смещения относительно центра пикселя к его границам. Отметим, что смещение на один пространственный период приводит к набегу фазы восстановленного изображения в  $2\pi$ . Резкая смена значений фазы и амплитуды происходит уже по мере перехода границы между соседними пикселями.

Продемонстрировать зависимость между расстоянием между плоскостями объектов и качеством восстановленного изображения можно с помощью эксперимента, для выполнения которого использовался упомянутый выше программный комплекс. Экспериментальная оценка включала в себя синтез полутооновых голограмм-проекторов особого тестового объекта, названного «уголки». Вид исходного объекта приведен на рис. 1.

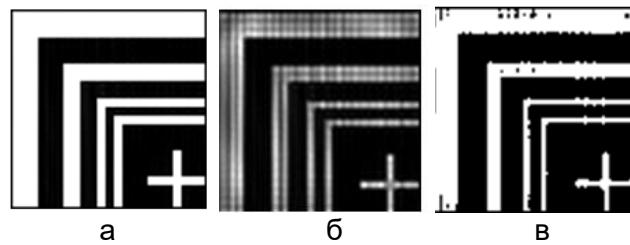


Рис. 1. Изображения тестового объекта: исходное (а); восстановленные с помощью синтезированной голограммы: до пороговой обработки (б); после (в)

Тестовый объект характеризовался размером линий креста  $1 \times 7$  пикселов. Два ближайших к кресту уголка были составлены из отрезков толщиной 1 пикселя, расстояние между ними также было равно 1 пикселу. Далее следовал промежуток шириной в 2 пикселя, за которым располагался третий уголок, ширина которого составляла 2 пикселя. Ширина четвертого уголка была равна 3 пикселям. Общий размер объекта таким образом составлял  $23 \times 23$  пикселя.

Параметры синтеза были выбраны в соответствии с условиями, определенными в работе [4] и в целом совпадают с параметрами, используемыми в предыдущем эксперименте. Т.е. размер минимального элемента объекта  $a_t$  составлял  $80 \times 80$  нм, размер пикселов плоскостей объекта и голограммы  $d_d = 20 \times 20$  нм, а рабочая длина волны  $\lambda = 13,5$  нм. При таких условиях угол падения опорного пучка  $\alpha$  должен быть равен  $14,67^\circ$ , а расстояние между голограммой и плоскостью ближайшего к ней объекта составлять не менее 20345 нм. Поскольку речь идет о достаточно сложном по структуре объекте, то в целях избавления от дополнительных помех, связанных с интерференцией нулевого и первого порядков дифракции голограммы оно было увеличено в два раза и составило  $R_h = 40690$  нм. Глубина резкости восстановленного изображения при указанных параметрах в соответствии с формулой (3) должна была составлять  $b = \pm 237$  нм. Вторая плоскость объекта ставилась чуть дальше от голограммы на некотором расстоянии  $\Delta$  относительно первой, изменяющемся в процессе эксперимента.

На рис. 2, а представлен график зависимости числа допустимых уровней пороговой обработки изображения, полученного в плоскости наилучшей установки на расстоянии  $R_h$ , отнесенных к максимальному числу градаций, достигаемому при данных параметрах синтеза и восстановления голограммы, от расстояния между плоскостями двух объектов  $\Delta$ . Фактически можно говорить о зависимости качества изображения от расстояния  $\Delta$ .

На графике хорошо заметно, что пока значение  $\Delta$  остается достаточно небольшим (в пределах нескольких длин волн), качество изображения в целом не сильно зависит от  $\Delta$ . Исключения составляют отдельные максимумы, соответствующие изображениям объекта с более высоким качеством, характерные для расстояний, при которых зарегистрированные объектные волны в процессе синтеза оказываются синфазными. В свою очередь, минимумы на графике соответствуют тем расстояниям, на которых фаза объектных волн оказывается противоположной.

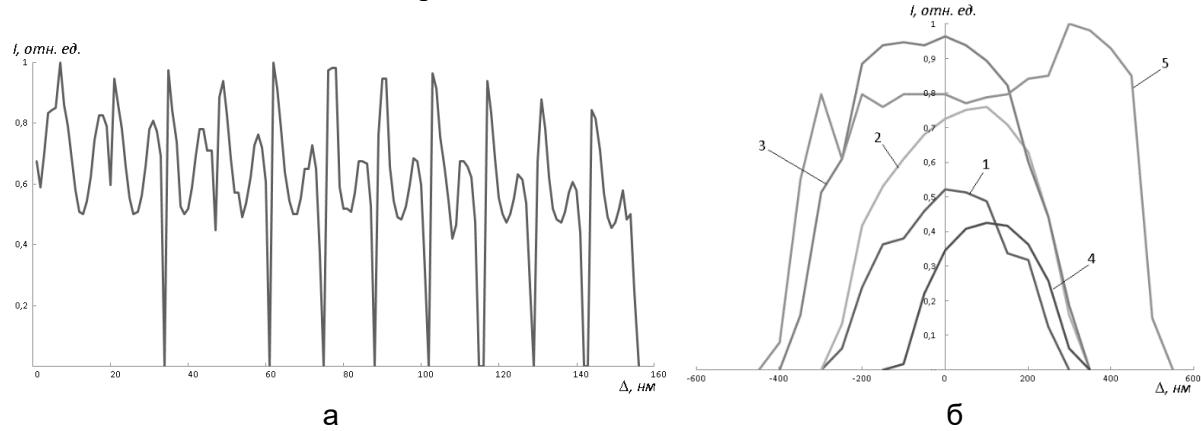


Рис. 2. Графики зависимости качества изображения: тестового объекта, полученного в плоскости наилучшей установки, от расстояния  $\Delta$  между плоскостями объектов при синтезе (а); восстановленного изображения тестового объекта от дефокусировки при различных значениях расстояния  $\Delta$  между плоскостями объектов при синтезе: 1 – без установки второй плоскости; 2 –  $\Delta = 4$  нм; 3 –  $\Delta = 21$  нм; 4 –  $\Delta = 195$  нм; 5 –  $\Delta = 199$  нм (б)

По мере увеличения  $\Delta$  значения минимумов приближаются к нулю: влияние апертуры уже не может компенсировать нарушение синфазности, в результате чего восстановление качественного изображения с помощью таких голограмм становится практически невозможным. В то же время синфазная запись объектных волн при отсутствии влияния апертуры позволяет значительно улучшить качество изображения. Описанная выше «неопределенность фазы при синтезе голограммы» приводит к

появлению резких переходов между соседними минимумом и максимумом вследствие резких изменений значений фазы.

При больших значениях расстояния  $\Delta$ , близких к  $b$ , влияние апертуры голограммы практически пропадает: качество изображения, в среднем, заметно ниже, за исключением отдельных максимумов, возникающих при синфазной записи за счет влияния дискретизации.

Расстояние между соседними максимумами соответствует рабочей длине волны  $\lambda$ , таким образом, проверка ряда значений при сдвиге в пределах длины волны, позволяет точно определить положение максимума.

Для непосредственной оценки глубины резкости изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных при некоторых заданных значениях  $\Delta$ , был восстановлен ряд изображений на расстояниях  $\delta$ , отличающихся от расстояния  $R_h$  на значения от  $-1000$  до  $1000$  нм с шагом  $50$  нм. Результаты исследования качества изображений в количестве градаций, нормированном по их максимальному числу, приведены на рис. 2, б.

Таким образом, установлено, что добавление второй плоскости объекта при условии совпадения фазы объектных волн позволяет увеличить не только глубину резкости, но и общее качество изображений (максимальное количество градаций). Наилучшее качество восстановленных изображений достигается при установке второй плоскости объекта на расстояниях, близких к значению предельной глубины резкости  $b$ , при этом глубина резкости изображения увеличивается в 2–3 раза.

В результате применения данного метода был установлен характер зависимости качества изображения объекта, восстановленного с помощью голограммы, синтезированной при использовании двух плоских объектов, от расстояния между объектами. Характер данной зависимости не изменяется при сохранении основных параметров синтеза. В соответствии с этой зависимостью, оптимальное, в плане качества восстановленного изображения, значение расстояния будет определяться синфазностью объектных волн при синтезе и должно быть близким к предельному значению глубины резкости.

**Заключение.** В результате применения данного метода был установлен характер зависимости качества изображения объекта, восстановленного с помощью голограммы, синтезированной при использовании двух плоских объектов, от расстояния между объектами. Характер данной зависимости не изменяется при сохранении основных параметров синтеза. В соответствии с этой зависимостью, оптимальное, в плане качества восстановленного изображения, значение расстояния будет определяться синфазностью объектных волн при синтезе и должно быть близким к предельному значению глубины резкости.

## Литература

1. Clube F.S.M. et al. Holographic microlithography // Optical Engineering. – 1995. – V. 34. – № 9. – P. 2724–2731.
2. Maiden A. et al. Nonplanar photolithography with computer-generated holograms // Optics letters. – 2005. – V. 30. – № 11. – P. 1300–1302.
3. Bay C. et al. Maskless photolithography via holographic optical projection // Optics letters. – 2010. – V. 35. – № 13. – P. 2230–2232.
4. Корешев С.Н. и др. Методы увеличения разрешающей способности и глубины резкости синтезированных голограмм-проекторов // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83. – № 12. – С. 62–68.

УДК 535.015

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНООСТРОВКОВОЙ  
ПЛЕНКИ СЕРЕБРА, СФОРМИРОВАННОЙ МЕТОДОМ  $\text{Na}^+$ - $\text{Ag}^+$  ИОННОГО  
ОБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА**

Харисова Р.Д.<sup>1</sup>, Гобузов С.Г.<sup>1</sup>, Орешкина К.В.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Сгибнев Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе исследовано формирование наноостровковой пленки серебра на поверхности силикатного стекла методом ионного обмена натрий-серебро с последующей термической обработкой на воздухе. Изучено влияние температурно-временных режимов термообработки на спектры пропускания полученных пленок серебра и размер частиц в наноостровковой пленке. Показано, что такие пленки могут существенно усиливать сигнал рамановского рассеяния, что открывает перспективы практического использования исследованных пленок в сенсорах, работающих на основе поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии.

**Ключевые слова:** ионный обмен, серебряные наночастицы, силикатное стекло, поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия, сенсорика.

**Введение.** Плазмонные металлические наночастицы вызывают значительный интерес в фотонике благодаря их уникальным оптическим свойствам. Потенциальные области применения металлических наночастиц включают в себя биосенсоры, поверхностно-усиленную рамановскую спектроскопию, солнечные батареи, доставку лекарственных средств, насыщающиеся поглотители, фотокаталит и др. Одно из важнейших применений – поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия (ПУРС). Впервые этот эффект наблюдался в 1974 г. на молекулах пиридина, нанесенных на шероховатый серебряный электрод [1]. Несмотря на то, что механизм эффекта все еще остается дискуссионным, возможность усиления разрешающей способности на 10–14 порядков сделало ПУРС эффективным методом детектирования различных веществ, позволяющим обнаружить даже одиночные молекулы [2].

Шероховатую металлическую поверхность можно получить методами химического осаждения. Недавно было замечено, что серебряная наноостровковая пленка (СНП) для ПУРС легко может быть получена на поверхности стекла, подвергнутого  $\text{Na}^+$ - $\text{Ag}^+$  ионному обмену. Метод ионного обмена (ИО) заключается в том, чтобы заместить в стекле один вид щелочных катионов (например, натрий) на другой тип щелочных металлов (литий, калий, рубидий, цезий) или на ионы переходных металлов (серебро, медь, таллий) из солевого расплава или другого источника ионов. Основное достоинство ИО наравне с простотой и гибкостью – способность достигать большой концентрации ионов серебра в силикатных стеклах, недостижимой при синтезе. Для получения СНП на поверхности стеклянных подложек к настоящему времени разработано два подхода [3, 4]:

- формирование наночастиц серебра в слоях стекла, подвергнутого  $\text{Na}^+$ - $\text{Ag}^+$  ИО и термообработке (ТО) при температурах близких к температуре стеклования или выше нее с последующим химическим удалением тонкого слоя стекла для появления СНП на поверхности стеклянной подложки. После ТО в ионообменном слое наночастицы серебра распределены градиентно: с увеличением расстояния от поверхности стекла концентрация наночастиц уменьшается. Таким образом, концентрацией наночастиц на поверхности стекла можно управлять не только параметрами ИО, но и с помощью толщины стравленного слоя;

– формирование наночастиц на поверхности стекла с помощью ИО и ТО в восстановительной атмосфере (водородной или насыщенной водяными парами). Из-за довольно низкой температуры обработки (200–250°C) наночастицы серебра практически не формируются в самом стекле. Более того, с помощью полинга стела с использованием микроструктурированного электрода можно получить одиночные наноструктуры на поверхности стекла.

Также стоит отметить, что СНП на поверхности ионообменных стекол можно получить при помощи электронного пучка или лазерного излучения.

В данной работе было изучено формирование СНП после  $\text{Na}^+$ - $\text{Ag}^+$  ИО и ТО без специальной восстановительной атмосферы, исследовано влияние параметров ТО на свойства образовавшейся СНП, а также продемонстрирована возможность использования таких пленок для сенсоров на основе метода ПУРС.

**Методика эксперимента.** В работе исследовалось силикатное стекло на основе системы  $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{ZnO}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ . Стекло синтезировалось из химических реагентов особой чистоты в высокотемпературной печи при температуре 1500°C в платиновых тиглях с перемешиванием расплава платиновой мешалкой для гомогенизации. Для дальнейших исследований из синтезированного стекла изготавливались полированные плоскопараллельные образцы.  $\text{Na}^+$ - $\text{Ag}^+$  ИО проводился в расплаве 5% $\text{AgNO}_3$ /95% $\text{NaNO}_3$  в течение 15 мин при температуре 320°C. После процедуры ИО с одной стороны образца удалялся слой стекла толщиной порядка 50 мкм, так чтобы ионы серебра оставались только с одной стороны образца. Такой подход позволял исключить влияние расположения образца в печи на свойства получаемой СНП. Для получения СНП проводилась ТО в муфельных печах при различных температурно-временных режимах, образцы помещались в печи стороной с серебром вверх. Спектры пропускания образцов регистрировались на двухлучевом спектрофотометре Lambda 650 в диапазоне 250–850 нм. Для исследования возможности использования полученных СНП в сенсорах измерялись спектры рамановского рассеяния водного растворов родамина 6Ж с помощью конфокального рамановского микроскопа InVia (Renishaw) при возбуждении излучением с длиной волны 633 нм с объективом 50 $\times$ /0,55.

**Результаты.** На рис. 1 показаны спектры пропускания СНП на поверхности ионообменного силикатного стекла, полученных после ТО при различных температурах. Заметим, что в результате ТО в объеме стекла молекулярные кластеры и наночастицы серебра не образуются, что объясняется отсутствием в составе стекла восстановителей для ионов серебра. Таким образом, на изменение пропускания в диапазоне длин волн от 300 нм влияет только формирование СНП.

Уже после первых 15 мин ТО при 350°C в спектре появляется полоса поглощения с максимумом в области 445 нм, которая соответствует плазмонному резонансу наночастиц серебра на поверхности исследуемого стекла. С увеличением времени ТО полоса поглощения смещается в сторону увеличения длин волн и появляется еще один максимум в области 355 нм. Положение последнего практически не зависит от длительности ТО. При температурах ТО 400–450°C, помимо указанных изменений, возникает полоса поглощения в районе 300 нм. После ТО при 500°C в течение 1 ч и более образуются широкие перекрывающиеся полосы поглощения, что усложняет интерпретацию спектров. Возможно, свою роль играет рассеяние, происходящее на крупных частицах серебра.

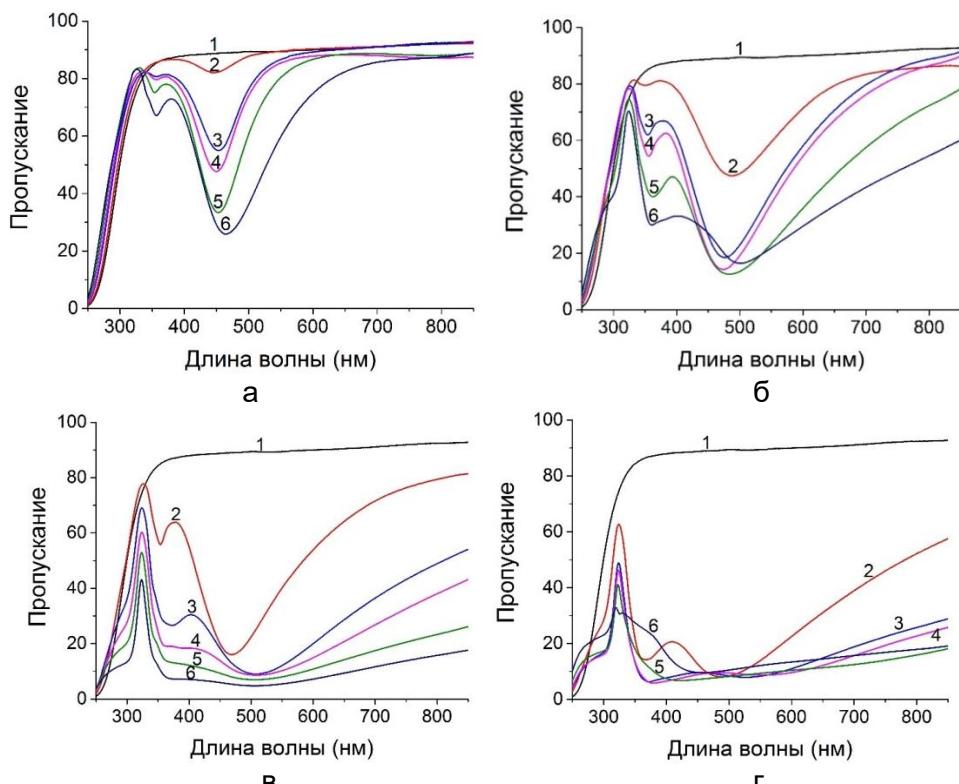


Рис. 1. Спектры пропускания ионообменного силикатного стекла (1) и того же стекла с СНП, сформированных на его поверхности после серебряного ИО и ТО при температурах 350°C (а); 400°C (б); 450°C (в); 500°C (г) длительностью: 0,25 ч (2); 1 ч (3); 1,5 ч (4); 3 ч (5) и 7 ч (6)

Описанные изменения пропускания СНП при увеличении длительности и температуры ТО могут быть вызваны увеличением размера наночастиц, изменением их формы и взаимным влиянием расположенных рядом частиц. Для изучения размеров и формы наноструктур серебра на поверхности силикатного стекла была использована сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). В качестве примера на рис. 2, а приведено изображение поверхности образца после ТО длительностью 7 ч при температуре 450°C.

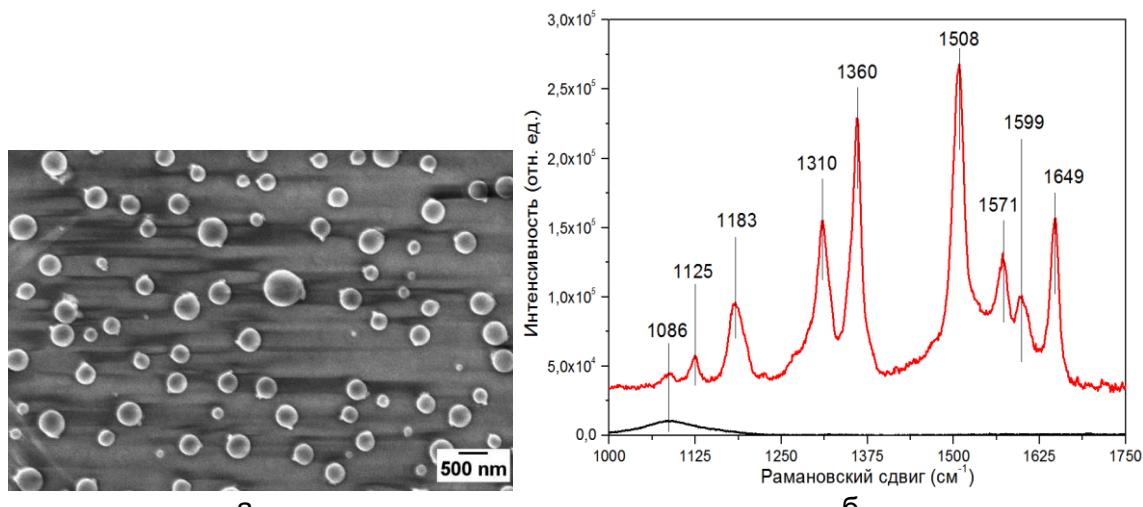


Рис. 2. Изображения поверхности силикатного стекла после  $\text{Na}^+$ - $\text{Ag}^+$  ИО и ТО с параметрами 450°C, 7 ч, полученные с помощью СЭМ (а); рамановский спектр капли водного раствора ( $8 \times 10^{-7}$  моль/л) родамина 6Ж на поверхности силикатного стекла с СНП, полученной после ИО ( $5\% \text{AgNO}_3$ , 320°C, 15 мин) и ТО (350°C, 7 ч) силикатного стекла (б)

Результаты СЭМ говорят о том, что форма наностровков серебра округлая, но форма наночастиц серебра не может быть сферической, так как они расположены на поверхности стекла. Наиболее вероятно, что наночастицы обладают полусферической формой, аналогично наночастицам в работе [4], в которой было описано формирование таких наночастиц на поверхности фосфатного стекла, подвергнутого  $\text{Na}^+$ - $\text{Ag}^+$  ИО и ТО в атмосфере водорода. Также снимки СЭМ свидетельствуют о том, что СНП характеризуется широким диапазоном размера частиц. При температуре ТО 400°C образуются в основном островки размером 100–150 нм; вследствие увеличения температуры до 450°C появляется больший разброс наностровков по размерам, их средний диаметр увеличивается до 350–400 нм.

Для изучения возможности применения полученных СНП в ПУРС на поверхность образцов наносилась капля  $8 \times 10^{-7}$  моль/л водного раствора родамина 6Ж. Использовались образцы с параметрами ТО 350–500°C, 7 ч. В качестве примера на рис. 2, б приведен рамановский спектр родамина 6Ж на СНП (ТО при 350°C) и спектр того же раствора, полученный при аналогичных условиях на поверхности стекла, не подвергнутого ИО и ТО. Эксперимент показал, что исследуемое силикатное стекло с СНП позволяет достоверно регистрировать наличие на поверхности родамина 6Ж в концентрации  $8 \times 10^{-7}$  моль/л.

**Заключение.** В работе изучено формирование СНП на поверхности силикатного стекла при помощи  $\text{Na}^+$ - $\text{Ag}^+$  ИО и ТО в воздушной атмосфере. После 15 мин ТО в спектрах пропускания появляются полосы, соответствующие полосе поглощения плазмонного резонанса наночастиц серебра, что свидетельствует о появлении СНП. Температура и длительность ТО оказывает влияние на размеры наночастиц в СНП, что подтверждается изображениями, полученными с помощью СЭМ. Данные, полученные с помощью рамановской спектроскопии, свидетельствуют о том, что СНП на поверхности исследованного силикатного стекла могут быть использованы в сенсорах на основе метода ПУРС. Таким образом, матрица использованного в работе силикатного стекла позволяет упростить технологию получения СНП, так как не требуется использование технологий химического травления стекла и обработки в восстановительной атмосфере.

## Литература

1. Fleischmann M. Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode // Chemical Physics Letters. – 1974. – V. 26. – № 2. – P. 163–166.
2. Kneipp K. Single molecule detection using surface-enhanced Raman scattering (SERS) // Physical review letters. – 1997. – V. 78. – № 9. – P. 1667.
3. Chen Y. Ag nanoparticles embedded in glass by two-step ion exchange and their SERS application // Optical Materials Express. – 2011. – V. 1. – № 2. – P. 164–172.
4. Zhurikhina V.V. Self-assembled silver nanoislands formed on glass surface via out-diffusion for multiple usages in SERS applications // Nanoscale research letters. – 2012. – V. 7. – № 1. – P. 676.

УДК 544.032.65

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ,  
ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ В ЖИДКОСТИШакирова Д.Т.<sup>1</sup>Научный руководитель – к.т.н. Самохвалов А.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены антибактериальные и оптические свойства коллоидных растворов наночастиц селена и кремния, полученных путем лазерной абляции в различных жидкостях (дистиллированная вода, пероксид водорода, раствор полиэтиленгликоля, изопропанол). Проведено сравнение оптических и эффективности антибактериальных свойств коллоидных растворов до и после фрагментации лазерным излучением с длинами волн 780 нм и 1,064 мкм.

**Ключевые слова:** наночастицы, лазерная абляция в жидкости, коллоидный раствор, антибактериальность, фрагментация, синглетный кислород.

**Введение.** В последние десятилетия ведутся активные исследования антибактериальных свойств наночастиц. Основным механизмом деструкции патогенных бактерий является окисление и разрушение клеточной мембраны синглетным кислородом, образующимся на наночастицах [1]. Были исследованы различные наночастицы: Ag, Au, Ti/TiO<sub>2</sub>, Zn/ZnO, а также комбинированные (например, Au-Ag) [2–5]. Большая часть образцов по результатам экспериментов показала высокую эффективность разрушения штаммов бактерий, однако металлические ионы являются токсичными для человеческого здоровья, в связи с чем неметаллические частицы, такие как Se и Si, являются более предпочтительными [6].

Большой интерес представляют фрагментированные коллоидные растворы, обещающим быть более эффективными в разрушении клеточных мембран бактерий за счет меньшего размера наночастиц [7].

Исследования антибактериальных свойств проводились на таких штаммах, как *Enterococcus faecium*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*.

**Материалы и экспериментальная установка.** Для изучения были выбраны селен и кремний. На первом этапе исследования были получены соответствующие коллоидные растворы лазерной абляцией в различных режимах, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Режимы лазерного воздействия на образцы кремния Si и селена Se

Режимы		Si	Se
Первичный колloid №1, $\lambda=780$ нм	Длительность импульса $\tau$ , фс	100	100
	Частота $f$ , кГц	10	10
	Длительность воздействия, мин	40	40
	Энергия $E_{имп}$ , мкДж	630	630
Первичный колloid №2, $\lambda=1,064$ мкм	Длительность импульса $\tau$ , нс	200	200
	Частота $f$ , кГц	4	4
	$E_{имп}$ , мДж	1	0,2
	Скорость сканирования, мм/с	200	200
Фрагментация коллоида №2, $\lambda=1,064$ мкм	Длительность импульса $\tau$ , нс	200	200
	Частота $f$ , кГц	10	10
	$E_{имп}$ , мДж	1	0,2
	Скорость сканирования, мм/с	1000	1000

Для получения первичных и фрагментированных коллоидов были использованы Ti:Sapphire-лазер с длиной волны 780 нм и Минимаркер с длиной волны 1,064 мкм. В данном случае жидкостью, в которой проводилась абляция, служила дистиллированная вода.

**Исследование антибактериальных свойств коллоидных растворов.** Образцы были отправлены в лабораторию медицинской бактериологии Санкт-Петербургского НИИ эпидемиологии и микробиологии имени Пастера. Изучали действие на четыре штамма бактерий с различными биологическими свойствами и строением клеточной стенки (референтные штаммы): *Enterococcus faecium*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*. Рост бактерий или его отсутствие регистрировали двумя методами: по оптической плотности и путем высева на плотные питательные среды и подсчета выросших через 24 ч колоний. Высевы делали после 5 мин экспозиции бактерий с раствором частиц и через 60 мин.

По результатам проведенных исследований более эффективными оказались коллоидные растворы наночастиц кремния, в связи с чем дальнейшие эксперименты проводились именно с образцами кремния с использованием лазерной установки Минимаркер.

**Генерация наночастиц Si путем лазерной абляции в различных жидкостях.** На втором этапе работы были получены коллоидные растворы наночастиц Si в различных жидкостях: дистиллированная вода, раствор ПЭГ 3,7%, пероксид водорода 3%, изопропиловый спирт и раствор глюкозы 5%. Все первичные коллоиды были получены при длительности импульса 200 нс, частоте следования импульсов 10 кГц, мощности в импульсе 0,6 мДж и скорости сканирования 500 мм/с (лазер минимаркер). Образцы сканировались по спирали (100 витков, размер 5×5 мм).

Далее проводилась фрагментация определенных образцов: коллоидных растворов на основе дистиллированной воды и раствора ПЭГ. Образцы сканировались по спирали 10×10 мм, режимы фрагментации приведены в табл. 2.

Таблица 2. Режимы фрагментации коллоидных растворов Si

Жидкость	Длительность импульса $t$ , нс	Мощность в импульсе $E_{имп}$ , мДж	Частота следования импульсов $f$ , кГц	Скорость сканирования $v$ , мм/с	Количество проходов
Дистиллированная вода	200	0,6	20	1000	2000
Раствор ПЭГ	200	1	30	1500	1500

**Результаты.** По результатам первичных исследований большей антибактериальной активностью обладают коллоидные растворы наночастиц кремния, причем самым эффективным оказался первичный коллоид, не прошедший фрагментацию (табл. 1, первичный коллоид №2).

Были получены спектры пропускания коллоидных растворов наночастиц кремния в различных жидкостях (рисунок, а) и спектры пропускания коллоида на основе раствора ПЭГ на различных этапах фрагментации (рисунок, б).

Из рисунок, б видно, что в процессе фрагментации пропускание коллоидного раствора резко увеличивается, но практически не меняется после 750 проходов.

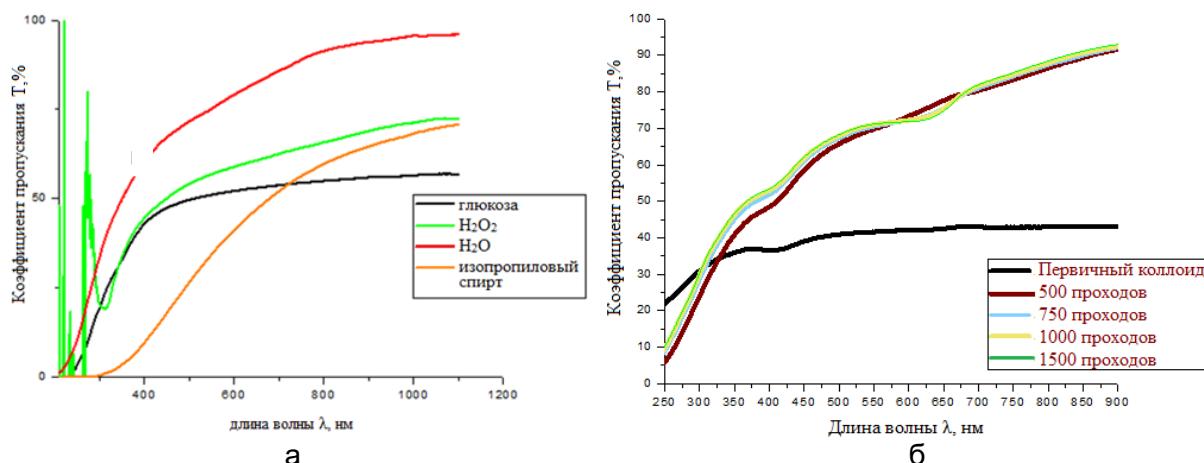


Рисунок. Спектры пропускания коллоидных растворов наночастиц кремния, полученных путем лазерной абляции: в различных жидкостях (черная линия соответствует коллоиду на основе глюкозы, зеленая – на основе пероксида водорода, красная – на основе дистиллированной воды (фрагментированный коллоид), оранжевая – на основе изопропилового спирта) (а); в растворе ПЭГ (черная линия соответствует первичному коллоиду, красная – после 500 проходов в процессе фрагментации, голубая – после 750, желтая – после 1000, зеленая – после 1500 проходов) (б)

**Заключение.** В работе выполнено исследование антибактериальных свойств коллоидных растворов наночастиц Si и Se, по результатам которых были выбраны режимы, обеспечивающие наибольшую эффективность образцов. Более активными по отношению к штаммам бактерий *Enterococcus faecium*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* оказались кремниевые коллоиды, причем лучшие результаты показал первичный коллоидный раствор.

Были получены спектры пропускания первичных и фрагментированных коллоидов наночастиц Si в различных жидкостях, дальнейшие исследования их антибактериальных свойств продолжается.

### Литература

1. Донцов В.И., Крутько В.Н., Мрикаев Б.М., Уханов С.В. Активные формы кислорода как система: значение в физиологии, патологии и естественном старении // Труды ИСА РАН. – 2006. – Т. 19. – С. 50–69.
2. Simakin A.V., Voronov V.V., Kirichenko N.A., Shafeev G.A. Nanoparticles produced by laserablation of solids inliquidenvironment // Appl. Phys. – 2004. – V. A79 – P. 1127–1132.
3. Fidel M.G., Peggy L., Banuelos A., Orrantia E., Nino N., Elpidio M.S., Ruiz F., Bach H., Av-Gay Y. Synthesis, characterization, and evaluation of antimicrobial and cytotoxic effect of silver and titanium nanoparticles // Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine. – 2010. – № 6 – P. 681–688.
4. Chang Hyun Bae, Sang Hwan Nam, Seung Min Park Formation of silver nanoparticles by laser ablaton of silver target in NaCl solution // Applied Surface Science. – 2002. – № 197-198. – P. 628–634.
5. Svetlichnyi V., Shabalina A., Lapin I., Goncharova D., Nemoykina A. ZnO Nanoparticles Obtained by Pulsed Laser Ablation and Their Composite with Cotton Fabric: Preparation and Study of Antibacterial Activity // Appl. Surface Sci. – 2016. – V. 372. – P. 20–29.
6. Hossain F., Perales-Perez O.J., Hwang S., Roman F. Antimicrobial nanomaterials as water disinfectant: Applications, limitations and future perspectives // Science of the Total Environment. – 2014. – № 466-467. – P. 1047–1059.
7. Linlin wang, Chen Hu, Longquan Shao. The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future // International Journal of Nanomedicine. – 2017. – № 12. – P. 1227–1249.

УДК 621.373.826; 535.211

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОСТЫВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ  
БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАКОРотКИХ  
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Шамова А.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.т.н., профессор Яковлев Е.Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе представлена аналитическая модель, качественно описывающая пространственное распределение накопленного тепла на поверхности биологической ткани при многоимпульсном лазерном облучении импульсами различной длительности. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по облучению сухой костной ткани и свиной кожи ультракороткими лазерными импульсами. Рассмотрен процесс карбонизации костной ткани при воздействии коротких и ультракоротких лазерных импульсов. Применение модели к конкретной биологической ткани может существенно упростить подбор оптимальных режимов лазерной обработки, необходимых для проведения эффективных хирургических операций.

**Ключевые слова:** ультракороткие лазерные импульсы, твердые биологические ткани, свиная кожа, карбонизация, накопленное тепло, коэффициент поглощения.

**Введение.** Актуальной задачей современной лазерной медицины является разработка методов обработки различных биологических тканей с минимальными повреждениями областей, расположенных вокруг зоны облучения. Наиболее перспективными в этом направлении являются лазерные системы, генерирующие импульсы с ультракороткой длительностью. Лазерная обработка биотканей ультракороткими импульсами имеет ряд преимуществ. Характерные времена преобразования световой энергии в тепловую значительно превышают длительность лазерного импульса, поэтому тепловые процессы развиваются после его окончания [1]. В результате становится возможным проводить различные операции с минимальными термическими повреждениями прилегающих областей. Высокое качество лазерного луча обеспечивает фокусировку излучения в области до 5 мкм [2], что позволяет осуществлять обработку фрагментов биотканей соответствующих размеров. К настоящему времени показана перспективность применения подобных лазерных систем в дерматологии и хирургии твердых тканей [3, 4]. В медицине при обработке как мягких, так и твердых биотканей часто используются режимы многоимпульсного облучения. Однако в этом случае может произойти накопление тепла за пределами области лазерного воздействия, что способно привести к значительным повреждениям окружающих зону обработки тканей. Примером является карбонизация биоткани, приводящая к необратимым клеточным повреждениям [4, 5]. Поэтому накопление тепла необходимо учитывать при подборе режима облучения для проведения различных операций. В связи с этим следует проанализировать особенности теплового воздействия серии ультракоротких лазерных импульсов на биоткани при многоимпульсном облучении.

**Теоретическое моделирование: модель остывания.** Любая биоткань имеет сложную, многокомпонентную структуру, в результате чего различные физико-химические процессы могут происходить при разных температурах, что значительно усложняет процесс взаимодействия лазерного излучения с ней [5]. В связи с этим для упрощения анализа тепловых процессов, происходящих при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на биоткани, в качестве модельных объектов выбраны обезвоженная костная ткань и свиная кожа, которые рассматриваются как квазиоднородные среды с усредненными значениями теплофизических и оптических параметров.

При разработке модели остывания используется предположение о том, что при воздействии как коротких, так и ультракоротких импульсов на различные биоткани, стадия остывания является более продолжительной, чем стадия нагрева [6]. Именно эта стадия и определяет процесс теплового последействия в обоих случаях. При этом время теплового воздействия ультракоротких лазерных импульсов соизмеримо со временем воздействия наносекундных импульсов [6].

Известно, что биоткани имеют малую температуропроводность [7]. В этом случае радиус зоны облучения значительно превышает размер прогретой за счет теплопроводности области как для коротких, так и для ультракоротких лазерных импульсов. Тогда можно считать, что распределение температуры в области воздействия излучения лазера к моменту начала остывания среды повторяет распределение поглощенной плотности энергии лазерного излучения (гауссово распределение) [8]

$$T(r) = T_m e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}, \quad (1)$$

где  $T_m$  – максимальная температура нагрева поверхности биоткани к моменту начала остывания;  $r_0$  – радиус пятна лазерного излучения.

В модели предполагается, что вся поглощенная энергия идет на нагревание, тогда

$$T_m = \frac{\alpha A E}{C}, \quad (2)$$

где  $E$  – плотность энергии лазерного излучения;  $\alpha$ ,  $A$ ,  $C$  – коэффициент поглощения, поглощающая способность и объемная теплоемкость биоткани, соответственно.

Считая, выражение (2) начальным распределением температуры, и решая уравнение теплопроводности, описывающее остывание нагретой области

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (3)$$

где  $a$  – температуропроводность биоткани, получаем распределение температуры по радиусу и во времени к моменту прихода второго импульса

$$T(t, r) = \frac{T_m r_0^2}{(r_0^2 + 4at)} \exp\left(-\frac{r^2}{(r_0^2 + 4at)}\right). \quad (4)$$

Температура поверхности биоткани (накопленная температура) на расстоянии  $r$  от оси лазерного пучка при воздействии  $N$  импульсов, следующих с частотой  $f$ , к моменту прихода  $N+1$  импульса составит

$$\Delta T(t = \frac{N}{f}, r) = T_m \sum_{i=1}^N \frac{r_0^2}{\left(r_0^2 + 4a \frac{i}{f}\right)} \exp\left(-\frac{r^2}{\left(r_0^2 + 4a \frac{i}{f}\right)}\right). \quad (5)$$

Выражение (5) описывает изменение температуры поверхности биоткани относительно начальной (комнатной) температуры.

## Результаты

1. Модельный объект – сухая костная ткань. В эксперименте использовались установка «Минимаркер-2» (ООО «Лазерный Центр», Россия) на базе иттербийового импульсного волоконного лазера и микроскоп «Axio Imager.A1m» (Carl Zeiss, Германия) с CCD-камерой «AxioCam ICc3» (Carl Zeiss, Германия). Образцом являлась высушенная при комнатной температуре в течение 6 месяцев после экстракции оленя кость толщиной  $4 \pm 0,2$  мм. Параметры режима облучения, а также

оптические и теплофизические характеристики костной ткани, используемые при моделировании, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные

	Параметр	Значение	
		Наносекунд- ный лазер	Фемтосекунд- ный лазер [7]
$\lambda$	Длина волны лазерного излучения, мкм	1,07	1,03
$E$	Плотность энергии лазерного импульса, Дж·см <sup>-2</sup>	3,5	40
$\tau$	Длительность лазерного импульса	50 нс	320 фс
$r_0$	Радиус пятна лазерного излучения (по уровню $e^{-2}$ ), мкм	30	6,3
$t$	Время облучения, с	10	
$f$	Диапазон частот следования лазерных импульсов, кГц	1–22	
$A$	Поглощающая способность костной ткани [4]	0,22–1	
$\alpha$	Коэффициент поглощения костной ткани [5], см <sup>-1</sup>	10–25	
$k$	Теплопроводность костной ткани [7], Вт·см <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	3,56·10 <sup>-2</sup>	
$C$	Теплоемкость костной ткани [4], Дж·см <sup>-3</sup> ·К <sup>-1</sup>	1,4	
$a$	Температуропроводность костной ткани [7], см <sup>2</sup> ·с	2,5·10 <sup>-2</sup>	

При воздействии на биоткань наносекундных лазерных импульсов с частотами их следования 1 и 10 кГц морфология ее поверхности не изменяется, что соответствует полученным в расчете малым значениям накопленной температуры (рис. 1). В ходе эксперимента установлено, что при частоте следования импульсов 15 кГц, на шестой секунде облучения происходит карбонизация ткани. При этом было получено несоответствие между наблюдаемыми в эксперименте изменениями поверхности и рассчитанным значением остаточной температуры (рис. 1, а). Поэтому исходные значения коэффициента поглощения и поглощающей способности при временах облучения с шестой по десятую секунды были увеличены примерно в 1,5 раза и 5 раз, соответственно. В этом случае остаточная температура поверхности биоткани превышает температуру карбонизации на расстоянии 0,5 мм от центра лазерного пятна, что соответствует внешнему радиусу карбонизированной области, полученному в эксперименте (рис. 1, б) [8].

В работе [4] приведены экспериментальные данные по фемтосекундной лазерной обработке сухой говяжьей кости. Параметры используемых в эксперименте [4] режимов облучения приведены в табл. 1. Облучение образца проводилось в течение 10 с при частотах следования импульсов от 1 кГц до 22 кГц. При возрастании частоты следования импульсов от 1 до 20 кГц было зафиксировано линейное увеличение остаточной температуры поверхности биоткани (рис. 2). При этом происходила абляция костной ткани без карбонизации. Рассчитанные значения остаточной температуры хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [4] (рис. 2). При 22 кГц наблюдалось резкое повышение остаточной температуры поверхности образца выше 400°C. При расчете остаточной температуры с учетом изменения оптических характеристик костной ткани в результате карбонизации полученное значение (400°C) попадет в доверительный интервал, приведенный в [4]. Казалось бы, подобное совпадение позволяет сделать вывод, что при действии фемтосекундных лазерных импульсов, так же как и при облучении наносекундными импульсами, определяющая роль принадлежит изменению оптических свойств кости,

вызванному карбонизацией. Оптические свойства биоткани должны изменяться в области лазерного воздействия, где сфокусировано падающее излучение. В эксперименте [4] наблюдаются оплавление поверхности и абляция. Оплавленная поверхность белеет и предположить, что поглощение для последующего импульса возрастет трудно. В этом случае можно предположить парофазный механизм карбонизации, который запускается при активной абляции кости. Реакция карбонизации протекает в аблированных частицах кости в воздухе, и ее продукты в виде сажи осаждаются обратно в область пятна на стенки лазерного кратера, изменяя оптические свойства поверхности к следующему импульсу.

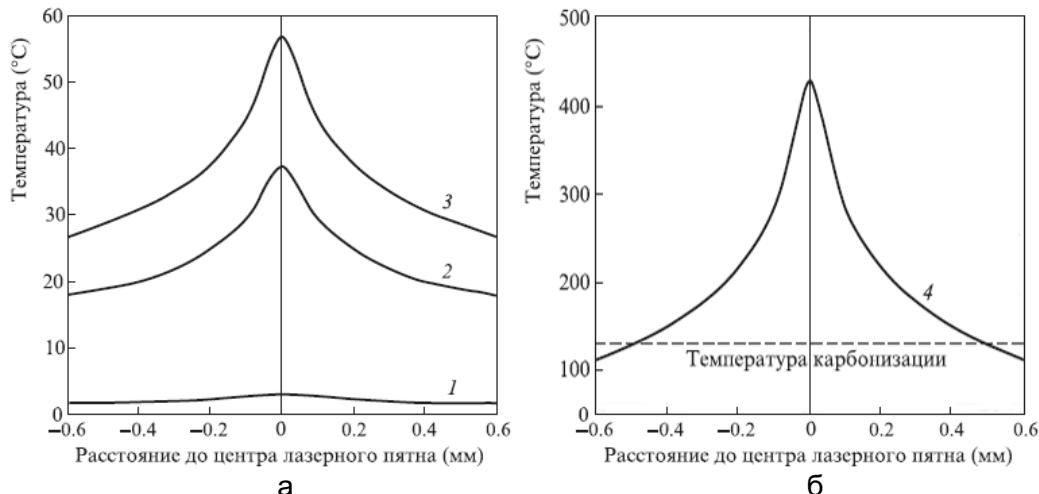


Рис. 1. Теоретическое радиальное распределение температуры, накопленной поверхностью обезвоженной костной ткани, в области, расположенной вокруг зоны лазерного воздействия, при многоимпульсном наносекундном облучении: при постоянных  $\alpha$  и  $A$  для  $f=1 \text{ кГц}$  (1),  $10 \text{ кГц}$  (2) и  $15 \text{ кГц}$  (3) (а) и при переменных  $\alpha$  и  $A$  для  $f=15 \text{ кГц}$  (б) [8]

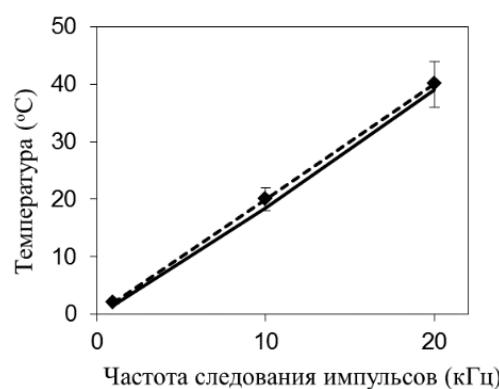


Рис. 2. Экспериментальная зависимость усредненной накопленной температуры поверхности сухой костной ткани (относительно комнатной температуры) от частоты следования импульсов при многоимпульсном фемтосекундном облучении: сплошная линия – расчет, штриховая линия – эксперимент [4]

2. Модельный объект – свиная кожа. Образец кожи брался с брюшной части свиньи. Перед началом эксперимента кожа хранилась в физиологическом растворе. Толщина образца составляла  $1,9 \pm 0,2 \text{ мм}$ . Оптические и теплофизические параметры свиной кожи представлены в табл. 2. Для того чтобы учесть рассеяние биоткани, в формуле (2) вместо коэффициента поглощения  $\alpha$  используется коэффициент экстинкции  $\mu_r$  (табл. 2). Облучение образца проводилось с помощью лазерной системы, состоящей из титан-сапфирового фемтосекундного лазера TiF-100-F4 («Авеста-Проект», Россия) и регенеративного усилителя RAP1500 («Авеста-Проект», Россия), со

следующими параметрами излучения: центральная длина волны 800 нм,  $\tau=100$  фс,  $f=10$  Гц.

Таблица 2. Оптические и теплофизические характеристики свиной кожи

	Параметр	Значение
$A$	Поглощающая способность свиной кожи [9]	0,49
$\mu_r$	Коэффициент экстинкции свиной кожи [9], $\text{см}^{-1}$	13
$k$	Теплопроводность свиной кожи [10], $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$4,5\cdot10^{-3}$
$C$	Теплоемкость свиной кожи [10], $\text{Дж}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$	3,35
$a$	Температуропроводность свиной кожи [10], $\text{см}^2\cdot\text{с}$	$1,32\cdot10^{-3}$

При воздействии на свиную кожу фемтосекундных лазерных импульсов ( $f=10$  Гц,  $N=600$ ) морфология ее поверхности вокруг абляционного кратера не изменяется (рис. 3, а), что соответствует полученным в расчете малым значениям накопленной температуры (рис. 3, б). Стоит отметить, что данные значения хорошо согласуются с результатами работы [11], в которой при облучении свиной кожи лазерными импульсами ( $\tau=300$  пс,  $f=50$  Гц,  $E=0,6$  Дж/см<sup>2</sup>) наблюдалось повышение температуры примерно на 2°C.

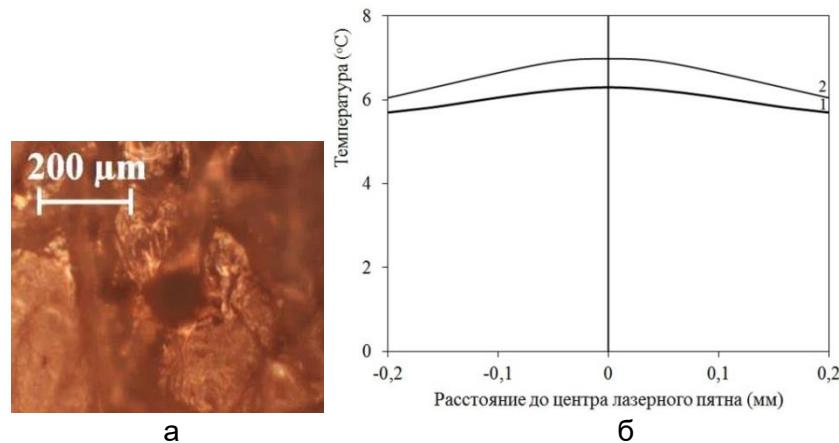


Рис. 3. Снимок оптической микроскопии свиной кожи после облучения фемтосекундными лазерными импульсами ( $f=10$  Гц,  $N=600$ ,  $E=7$  Дж/см<sup>2</sup>) (а); теоретическое радиальное распределение температуры, накопленной поверхностью свиной кожи, в окружающей зоне лазерного воздействия области при многоимпульсном фемтосекундном облучении ( $f=10$  Гц,  $N=600$ ), при различных значениях плотности энергии излучения: 1 Дж/см<sup>2</sup> (1), 7 Дж/см<sup>2</sup> (2) (б)

**Заключение.** В работе представлена аналитическая модель, качественно описывающая остаточный нагрев поверхности биоткани при многоимпульсном облучении ультракороткими лазерными импульсами. Предположение о том, что при действии ультракоротких лазерных импульсов на биоткань стадия остывания, являющаяся более продолжительной, чем стадии фотовозбуждения и нагрева, определяет конечный результат теплового последействия, позволило применить одинаковый подход для анализа остаточного нагрева ее поверхности серией лазерных импульсов, как с короткой, так и с ультракороткой длительностью.

Получено хорошее согласие результатов моделирования с данными экспериментальных исследований, выполненных автором работы по облучению обезвоженной костной ткани наносекундными лазерными импульсами и свиной кожи фемтосекундными импульсами, а также с экспериментальными данными, представленными в работах [4, 11]. Показана необходимость учета изменения оптических параметров твердой биоткани в результате ее карбонизации при многоимпульсном воздействии наносекундных лазерных импульсов. Изменение

оптических свойств в зоне лазерного облучения при действии фемтосекундных импульсов может быть инициировано очаговым характером продуктов парофазной реакции карбонизации кости. Однако это предположение требует дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

В лазерной хирургии при определении оптимальных параметров лазеров для обработки биотканей необходимо учитывать эффекты, происходящие не только на поверхности, но и в объеме. Дальнейшее развитие предложенной модели в этом направлении позволит упростить подбор режимов лазерной обработки, необходимых для проведения безопасных операций.

### Литература

1. Oraevsky A.A. Plasma mediated ablation of biological tissues with nanosecond-to-femtosecond laser pulses: relative role of linear and nonlinear absorption // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 1996. – V. 2. – № 4. – P. 801–809.
2. Бессонов Д.А. Исследование особенностей применения короткого и ультракороткого импульсного лазерного излучения для прецизионной микрообработки материалов. Обзор и анализ // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – № 4. – С. 69–76.
3. Watanabe S. Comparative studies of femtosecond to microsecond laser pulses on selective pigmented cell injury in skin // Photochemistry and Photobiology. – 1991. – V. 53. – № 6. – P. 752–762.
4. Gill R.K. The effects of laser repetition rate on femtosecond laser ablation of dry bone: a thermal and LIBS study // Journal of Biophotonics. – 2016. – V. 9. – № 1-2. – P. 171–180.
5. Sobol E.N. Phase transformations and ablation in laser-treated solids. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 1995. – 332 p.
6. Вейко В.П. Эффективное время термического воздействия сверхкоротких лазерных импульсов на диэлектрики // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – № 4. – С. 322–324.
7. Lundskog J. Heat and bone tissue. An experimental investigation of the thermal properties of bone and threshold levels for thermal injury // Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery. – 1972. – V. 9. – P. 1–80.
8. Беликов А.В. Нано- и фемтосекундное высокочастотное многоимпульсное воздействие лазерного излучения на обезвоженную костную ткань, роль накопленного тепла и модель остывания // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48. – № 8. – С. 755–760.
9. Yu T. Quantitative analysis of dehydration in porcine skin for assessing mechanism of optical clearing // Journal of biomedical optics. – 2011. – V. 16. – № 9. – P. 095002.
10. Knox III F.S. Thermal properties calculated from measured water content as a function of depth in porcine skin // Burns. – 1986. – V. 12. – № 8. – P. 556–562.
11. Jowett N. Heat generation during ablation of porcine skin with erbium: YAG laser vs a novel picosecond infrared laser // JAMA otolaryngology-head & neck surgery. – 2013. – V. 139. – № 8. – P. 828–833.

УДК 621.391.63

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛА СВЯЗИ ПО ВИДИМОМУ СВЕТУ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ**

Ширяев Д.С.<sup>1</sup>, Козырева О.А.<sup>1</sup>, Полухин И.С.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Бугров В.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрены характеристики канала связи по видимому свету, состоящего из матрицы из 16 люминофорных светодиодов и фотоприемного модуля, при использовании для передачи данных различных видов цифровой модуляции, таких как BPSK,  $\pi/4$ -QPSK, APSK-16. Определены параметры передачи данных и вид модуляции, при которых достигаются оптимальные характеристики канала связи.

**Ключевые слова:** системы связи по видимому свету, беспроводные оптические системы связи, VLC, OWC, Li-Fi, светодиоды.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», шифр 2017-14-582-0001-084, соглашение №14.581.21.0029, уникальный идентификатор RFMEFI58117X0029.

**Введение.** Беспроводная связь по видимому свету – это вид телекоммуникаций, использующий излучение видимого диапазона длин волн для передачи данных. Такой вид телекоммуникации может служить дополнением, или же альтернативой, существующим видам беспроводной связи в радиочастотном диапазоне. Одной из технологий организации беспроводной системы связи по видимому свету является технология Li-Fi (Light Fidelity) [1], которая предполагает использование светодиодного освещения для передачи данных. Данная технология представляет собой двунаправленную систему, с нисходящей линией связи по видимому диапазону длин волн, и восходящей линией связи по инфракрасному (ИК) диапазону. К преимуществам данной технологии можно отнести ее высокую помехозащищенность, так как отсутствует интерференция между передатчиками, а также высокую безопасность передачи данных, так как защита от перехвата информации осуществляется на физическом уровне.

На данный момент чаще всего для модуляции информационного сигнала используется On-Off keying (OOK) – схема модуляции, в которой информация передается путем «включения-выключения» светодиода с высокой частотой [2]. Данный тип модуляции имеет важный недостаток – низкую глубину модуляции, вследствие чего сигнал занимает довольно широкую полосу частот. Целью данной работы является исследование канала связи, построенного по технологии Li-Fi на белых люминофорных светодиодах, при использовании в нем цифровых схем модуляции, и оценка их эффективности.

**Схема измерений.** Схема измерений приведена на рис. 1.

Измерения проводились на канале связи, построенном при помощи матрицы из 16 люминофорных светодиодов SMD 5630 в качестве передатчика данных и матрицы из двух кремниевых фотодиодов Thorlabs FDS100 в качестве приемника данных. Информационный сигнал подается на матрицу светодиодов от генератора сигнала произвольной формы Keysight M8195, а с матрицы фотоприемников сигнал поступает

на осциллограф Keysight UXR0204A, работающий в режиме векторного анализа сигнала.

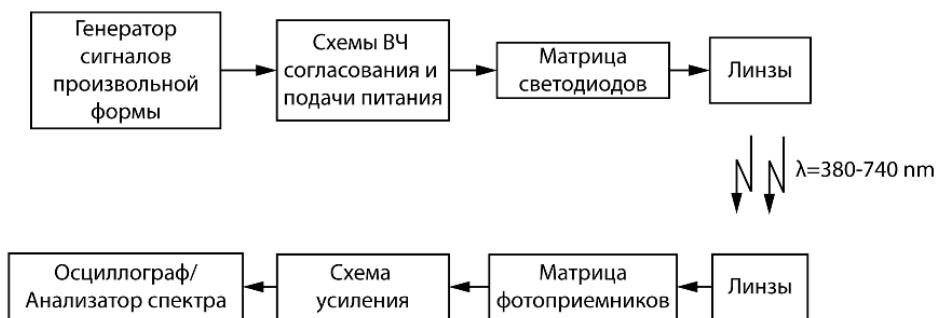


Рис. 1. Экспериментальная схема проведения измерений

**Результаты.** В результате измерений были получены констелляционные диаграммы, которые представляют значения комплексной амплитуды модулированных сигналов на плоскости I/Q квадратур. По виду констелляционных диаграмм можно определить вид искажения сигнала. Также были получены среднеквадратичные значения отношения сигнал-шум (ОСШ). На рис. 2 приведены констелляционные диаграммы для различных видов модуляции до прохождения канала связи и после него с несущей частотой 40 МГц и символкой скоростью 10 МБод.

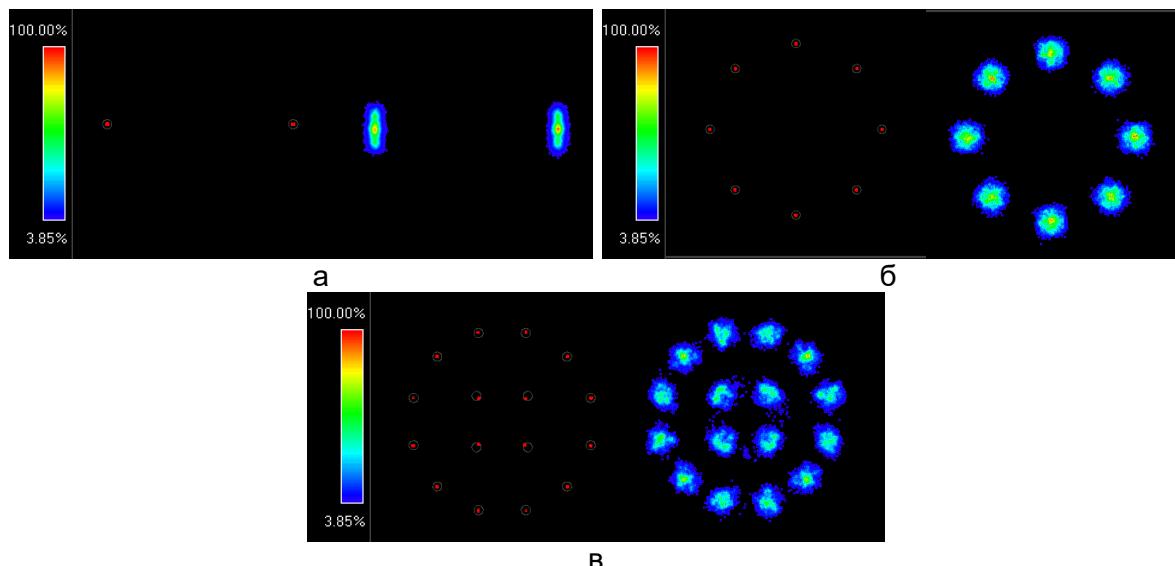


Рис. 2. Констелляционные диаграммы исходного сигнала (слева) и после прохождения канала связи (справа) при использовании: BPSK модуляции (а); π/4-QPSK модуляции (б); APSK16 модуляции (в)

Возможные искажения констелляционной диаграммы могут быть вызваны различными искажениями сигнала, такими как: фазовый сдвиг I/Q квадратур или дрожание фазы (джиттер); несогласованность амплитуд I/Q квадратур; квадратурная ошибка; интерференционные искажения; гауссов шум [3].

По виду диаграмм, приведенных на рис. 2, можно определить, что основное искажение в сигнал вносит гауссов шум. Гауссов шум вызывает разброс точек диаграммы вокруг соответствующих им позиций, что и наблюдается на приведенных выше диаграммах. Основным источником гауссова шума являются тепловые шумы источника и приемника сигнала.

Также были получены значения отношения сигнал-шум, которые составили: для BPSK модуляции – 28 дБ; для π/4-QPSK модуляции – 29 дБ; для APSK16 модуляции –

19 дБ. Из чего следует, что при использовании схем только фазовой модуляции с низким значением бит на символ (до 8), ОСШ практически не изменяется, но при использовании амплитудно-фазовой модуляции, ОСШ начинает значительно снижаться из-за уменьшения мощности сигнала в амплитудно модулированных символах.

Наиболее важной характеристикой канала связи является вероятность битовой ошибки (Bit Error Ratio, BER), отображающая вероятность неверно принять бит информации. Это значение можно оценить исходя из ОСШ по следующим уравнениям [4]:

$$P_b = Q\left[\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right], \quad (1)$$

$$P_b = \frac{2(1-\sqrt{M})}{\log_2 \sqrt{M}} \cdot Q\left[\left(\frac{3\log_2 \sqrt{M}}{M-1}\right)\frac{2E_b}{N_0}\right], \quad (2)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (3)$$

где  $P_b$  – вероятность ошибки на бит;  $E_b/N_0$  – отношение энергии одного бита к спектральной плотности мощности шума;  $M$  – количество точек на сигнальном созвездии;  $Q(x)$  – гауссов интеграл ошибок. Уравнение (1) позволяет оценить вероятность битовой ошибки для BPSK и  $\pi/4$ -QPSK модуляций, а уравнение (2) для APSK16 модуляции. Стоит отметить, что выражения в квадратных скобках являются аргументами гауссова интеграла ошибок, а не множителями.

Отношение энергии одного бита к спектральной плотности мощности шума можно получить из ОСШ в следующем виде:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \cdot \frac{W}{R}, \quad (4)$$

где  $S/N$  – отношение сигнал-шум;  $W$  – полоса частот, занимаемая сигналом;  $R$  – битовая скорость. Битовую скорость легко рассчитать из символьной скорости:

$$R = C \cdot \log_2 M, \quad (5)$$

где  $C$  – символьная скорость.

Рассчитанные значения отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума и вероятности битовой ошибки на расстоянии 1,5 м между передающим и приемным модулями приведены в таблице.

Таблица. Полученные значения  $E_b/N_0$  и BER

Вид модуляции	Битовая скорость, Мбит/с	$E_b/N_0$ , дБ	BER
BPSK	10	16	$5,8 \cdot 10^{-19}$
$\pi/4$ -QPSK	30	11	$3,3 \cdot 10^{-7}$
APSK16	40	10	$6 \cdot 10^{-3}$

Из полученных данных следует, что на расстоянии 1,5 м между передающим модулем и приемным вероятность битовой ошибки достаточно низкая ( $< 10^{-5}$ ), при использовании схем с глубиной модуляции до 3 бит на символ. При увеличении глубины модуляции, вероятность битовой ошибки возрастает, что уже не позволяет обеспечить достоверную передачу данных в канале связи.

**Заключение.** В работе проведено исследование характеристик канала связи по видимому изучению, таких как отношение сигнал-шум, отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума и вероятность битовой ошибки. Также по

констелляционным диаграммам было получено, что на канал связи оказывает довольно существенное воздействие аддитивный белый гауссовский шум.

Из полученных характеристик канала связи следует, что для построенного канала связи оптимальной из рассмотренных выше схем модуляции является относительная фазовая манипуляция  $\pi/4$ -QPSK, имеющая глубину модуляции 3 бита на символ. Данная схема модуляции позволяет обеспечить высокую скорость передачи данных при заданном значении вероятности битовой ошибки.

В дальнейшем планируются работы по уменьшению влияния гауссова шума на канал связи, а также исследование характеристик канала связи при более сложных схемах цифровых модуляций, таких как APSK32, QAM32, QAM64 и так далее.

### **Литература**

1. Haas H., Yin L., Wang Y., Chen C. What is Li-Fi? // Journal of Lightwave Technology. – 2016. – V. 34. – P. 1533–1544.
2. Rajbhandari S., McKendry J.J.D., Herrnsdorf J. et al. A review of gallium nitride LEDs for multi-gigabit-per-second visible light data communications // Semiconductor Science and Technology. – 2017. – V. 32. – № 2. – P. 1–40.
3. Львов А.А., Киселев В.В. Численное моделирование и анализ воздействия искажений на ofdm/qam-сигнал // Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2013. – Т. 13. – № 3. – С. 104–110.
4. Прокис Д. Цифровая связь / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.

УДК 537.312.52:544.537

**FABRICATION OF SPIRAL VARYING RETARDER FOR GENERATING RADIALLY POLARIZED LIGHT BY LASER-INDUSED MICROPLASMA**Shkuratova V.A.<sup>1</sup>, Kostyuk G.K.<sup>1</sup>, Sergeev M.M.<sup>1</sup>, Vikhrova E.Y.<sup>1</sup>Scientific supervisor – head teacher, PhD Tech., Kostyuk G.K.<sup>1</sup><sup>1</sup>ITMO University

The paper presents a fast, reliable and effective fabrication technique of spiral varying retarder (SVR) on Iceland spar ( $\text{CaCO}_3$ ) for generating radially polarized beam from linearly polarized Gaussian beam for  $\lambda=632.8$  nm. The SVR with diameter of 10 mm consisting of 20 sectors was made by laser-induced microplasma (LIMP) processing in less than 7 minutes. Testing of fabricated by LIMP technology SVR between two quarter wave plates with orthogonal slow axis in the setup with He-Ne laser at four analyzer positions ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ) confirmed the SVR's ability to generate radially polarized light of high purity.

**Key words:** laser beam shaping, radial polarization, annular beam, laser material processing, laser-induced microplasma, Iceland spar.

**Introduction.** Radially polarized light with cylindrical polarization symmetry due to its ability to form small focal spot size much less than any diffractive limited beams [1–3] is widely used in the large amount of high technology applications like optical trapping dielectric and metal particles [4, 5], atom cooling [6], super-resolution microscopy [7–9], record and storage of information [1], precision laser micropocessing of materials [10–13].

For generation of the radially polarized beams with annular shape it was suggested substantial number of optical elements (OEs) and units placed inside or outside the laser cavity [14–17], but most of them are difficult in realization, labor-intensive, characterized by significant energy losses and require a large number of OEs. Devices based on the using of a single OE have not yet implemented in essence, and its fabrication is the hardest technological problem. The promising direction of solving the problem of conversion high power linearly polarized Gaussian beams into radially polarized annular one is relatively easy in implementation using of single OE, as spiral varying retarder (SVR), made on a plate of birefringent uniaxial crystal with optical axis oriented parallel to the plate's surface (so-called Y-cut). The SVR is an OE divided into sectors with spirally varying relief providing a phase shift from 0 to  $4\pi$  [18]. The SVR is placed into an optical setup between two orthogonally oriented quarter wave ( $\lambda/4$ ) plates. To convert linearly polarized light into radially polarized one the SVR's slow axis should be positioned at the angle of  $45^\circ$  relative to the axis of the first  $\lambda/4$  plate. It was shown in [19] that for the successful conversion of beam with an error in the phase shift of less than 5%, SVR must consist of 8 sectors at least.

At present time, as far as we know, two fabrication techniques were used to make such plates [18, 19]. The first one was based on laser-induced backside wet etching (LIBWE) of crystalline quartz – the material most commonly used in polarization optics owing to its exceptionally low losses in a wide spectral range (0.15–4.50  $\mu\text{m}$ ) [18]. The quality of the radially polarized beam produced by SVR fabricated in accordance with LIBWE technology on a Y-cut of crystalline quartz turned out to be low. Authors of work [19] proposed SVR fabrication technology based on multistage dry etching process with inductively coupled argon gas plasma using silicone masks, the number of which was one less than the number of sectors. This technology was used for fabrication of eight-sectors SVR on the plate of uniaxial negative  $\alpha$ -BBO crystal with significant birefringence in the range of its high transparency (0.19–3.50  $\mu\text{m}$ ). It should be noted, that increasing the number of SVR's sectors will certainly complicate the process of fixing, centering and removal the masks and thus lead to a significant increase in the duration of SVR fabrication under this technology.

In this way, the SVR is a relatively simple and convenient in operation OE that can transform linearly polarized Gaussian beams into annular beams with high quality radial polarization. However, SVR is not widely used for laser beam conversion due to absence of fast, simple and advantageous technology of its fabrication on crystalline material with significant birefringence.

Recently, technology of OEs fabrication on optically transparent materials by laser-induced microplasma (LIMP) etching has been proposed [20, 21]. This technology was probed for fabrication of a random phase plate on uniaxial crystal plate of Iceland spar ( $\text{CaCO}_3$ ) with optical transparency in the range of 0.24 to 1.80  $\mu\text{m}$  [22]. In the experiments of its fabrication, the range of irradiation regimes was determined allowing to vary the etching depth in the range of up to 14  $\mu\text{m}$  [22].

The aim of this work is fabrication of SVR on the  $\text{CaCO}_3$  plate by LIMP and its testing in the setup with He-Ne laser ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ) to check the ability to generate radially polarized light.

**Fabrication procedure of SVR.** Experimental setup for SVR fabrication (fig. 1, a) contained a nanosecond fiber ytterbium laser ( $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ), whose beam was moved along the  $x$  and  $y$  axis by scanning system (1) based on galvanometric scanners. The focusing of the laser beam in the plane of the contact  $\text{CaCO}_3$  plate (3) and solid carbon target (4) was carried out using a flat-field objective ( $f=210 \text{ mm}$ ) (2), creating a beam diameter in the waist  $d_0=50 \mu\text{m}$  and processing in the field of  $100 \times 100 \text{ mm}$  size. The modification of the surface of the  $\text{CaCO}_3$  plate in accordance with the specified pattern and the required depth was carried out under the action of a microplasma producing in case of scanning a focused laser beam at the interface between two media.

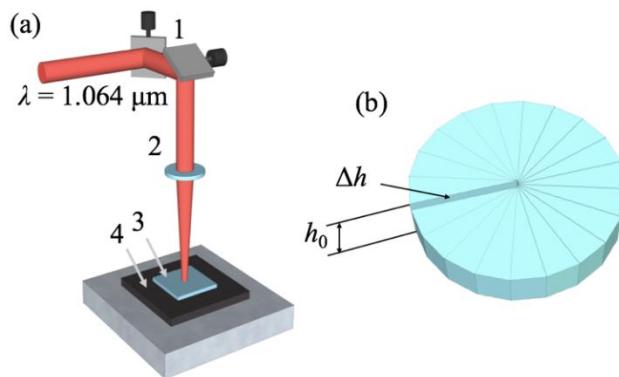


Fig. 1. Fabrication of SVR: experimental setup (a); schematically view of SVR (b)

Depth of etching estimation for each of SVR's sectors (fig. 1, b), was performed according to the equation:

$$h = \frac{2\lambda(s-1)}{s_{\max}(n_o - n_e)}, \quad (1)$$

where  $\lambda$  – the wavelength,  $s$  is the number of sector;  $s_{\max}$  – the total number of sectors;  $n_o$  and  $n_e$  – the refractive indices for ordinary and extraordinary waves respectively.

Estimated calculation of SVR's profile for  $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ,  $n_o=1.655$  and  $n_e=1.485$  (see table) showed that even with the number of sectors equal to 20, we fit into the experimentally found depth range in [22]. The choice of the number of sectors equal to 20 was due to the fact that with an increase in the number of sectors in SVR, the efficiency of converting linearly polarized light into light with radial polarization increases, approaching the theoretical limit [19].

The range of laser irradiation regimes that ensure the satisfactory quality of the surface in the etching area and the depth required for SVR's operation was determined experimentally. The pulse duration during the experiment was constant and equal to 50 ns,

pulse repetition rate  $v$  varied in the range of 50–80 kHz, power density –  $q=7.64\text{--}22.01\text{ MWt/cm}^2$ , scanning speed –  $S=700\text{--}1000\text{ mm/s}$ , the number of scans –  $N=1\text{--}10$ . After fabrication procedure of SVR, it was studied with scanning electron microscope (SEM) «Zeiss Supra 40VP» and profilometer «Hommel Tester T8000» (fig. 2).

Table. Etching depth of SVR

№	Calculated $h, \mu\text{m}$	Measured $h, \mu\text{m}$	Relative deviation, %	№	Calculated $h, \mu\text{m}$	Measured $h, \mu\text{m}$	Relative deviation, %
1	0	0	0	11	3.722	3.730	0.2
2	0.372	0.375	0.8	12	4.094	4.101	0.2
3	0.744	0.750	0.8	13	4.467	4.475	0.2
4	1.117	1.121	0.4	14	4.839	4.830	0.2
5	1.489	1.494	0.3	15	5.211	5.221	0.2
6	1.861	1.857	0.2	16	5.584	5.593	0.2
7	2.233	2.239	0.3	17	5.956	5.967	0.2
8	2.606	2.617	0.4	18	6.328	6.337	0.1
9	2.978	2.986	0.3	19	6.700	6.712	0.2
10	3.350	3.345	0.1	20	7.072	7.086	0.1

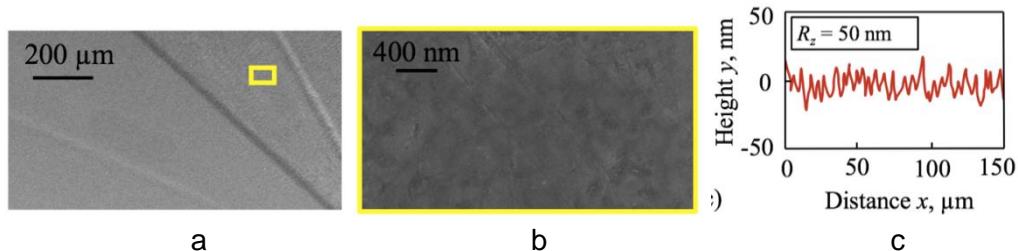


Fig. 2. SVR fabricated by LIMP: SEM-image with different magnification (a, b); roughness profile inside the SVR sector (c)

The spiral form of SVR and the gradually changing height of each sector are clearly seen from fig. 2, a and b. The surface quality in the area of microplasma flame action has been found acceptable. Also, there are no any punctures and cracks. The roughness of SVR's surface does not exceed 50 nm (fig. 2, c). Measured etching depth of each SVR's sectors and its relative deviation from calculated depth are given in table. The table shows that relative error of etching depth decreases with the increasing depth of sectors and is no more than 0.8%.

**Testing procedure of SVR.** To confirm the ability of fabricated by LIMP technology SVR to generate radially polarized light its was by placing it into experimental setup, which is shown in fig. 3, a. The experimental setup for testing of SVR contains He-Ne laser ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ) (1), telescope with  $3^\times$  magnification (2) for beam expanding, polarizer (3), SVR (5), slow axis of which was oriented at an angle of  $45^\circ$  to the first  $\lambda/4$  plate (4), the second  $\lambda/4$  plate (6) placed behind SVR and orthogonal to the first  $\lambda/4$  plate, analyzer (7), focusing lens ( $f=60\text{ mm}$ ), CDD-camera (9).

The demonstration of conversion the linearly polarized light into radially polarized light was produced through a registration of intensity distribution in the far field. The registration was in the lens focal plane upon four positions of analyzer ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ) relative to the transmission axis of polarizer, also with its absence in the optical setup. Choosing the He-Ne laser with beam quality  $M^2=1.0$  in the experimental setup caused by minimizing errors related to the quality of conversion of linearly polarized Gaussian beams. When the analyzer is absent in the SVR testing setup, annular intensity distribution is observed in the lens focal plane

(fig. 3, b). When placing it into the experimental setup there are clearly seen two rotating lobes during rotation of the analyzer (fig. 3, c). White arrows are the transmission axis direction of the analyzer. The obtained results show the evidence about SVR's conversion of linearly polarized He-Ne laser beam into high quality radially polarized beam.

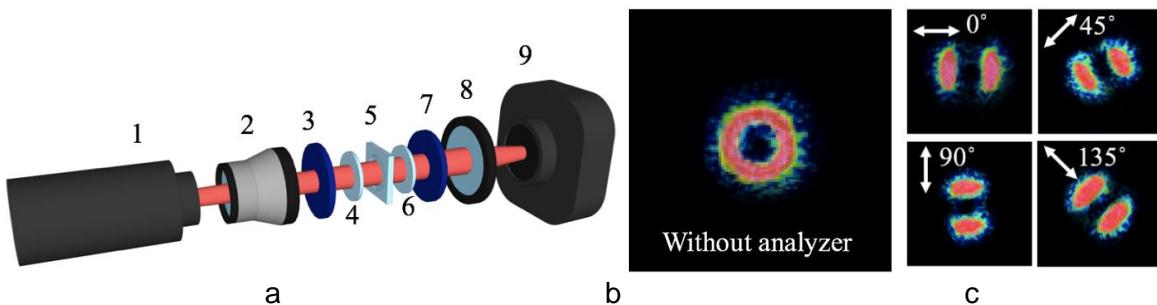


Fig. 3. Testing of SVR: experimental setup (a); annular intensity distribution of radially polarized beam in the far field (b); the far field intensity distribution upon analyzer rotation (c)

**Conclusion.** In this work, a fast, reliable and efficient fabrication technology of SVR for conversion of linearly polarized Gaussian beams into radially polarized beams is presented. The SVR was made on the plate of uniaxial crystal material (Iceland spar), the crystal axis of which is oriented parallel to the surface of the plate (Y-cut). The duration of fabrication of SVR with 20 sectors does not exceed 7 minutes.

Determination of laser irradiation ranges of regimes to achieve 50 nm roughness in the processed region and necessary depths of each sectors for perfect operation of SVR were found experimentally.

Testing of SVR was performed in the setup with He-Ne laser. Test results provide our hope that SVR fabricated by LIMP will be widely applied for conversion of linearly polarized Gaussian beams into radially polarized annular beams.

## References

1. Quabis S., Dorn R., Eberler M., Glockl O., Leuchs G. Focusing light to a tighter spot // Optics Communications. – 2000. – V. 179. – № 1-6. – P. 1-7.
2. Dorn R., Quabis S., Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam // Physical Review Letters. – 2003. – V. 91. – № 23. – P. 233901.
3. Lerman G.M., Levy U. Effect of radial polarization and apodization on spot size under tight focusing conditions // Optics Express. – 2008. – V. 16. – № 7. – P. 4567–4581.
4. Zhan Q. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization // Optics Express. – 2004. – V. 12. – № 15. – P. 3377–3382.
5. Roy S., Ushakova K., Van den Berg Q., Pereira S., Urbach H. Radially polarized light for detection and nanolocalization of dielectric particles on a planar substrate // Physical Review Letters. – 2015. – V. 114. – № 10. – P. 103903.
6. Li G., Zhang P., Zhang T. Three-dimensional cooling of a single atom by a pair of counter-propagating tightly focused beams // Optics Express. – 2015. – V. 23. – № 18. – P. 23571–23581.
7. Kozawa Y., Sato S. Numerical analysis of resolution enhancement in laser scanning microscopy using a radially polarized beam // Optics Express. – 2015. – V. 23. – № 3. – P. 2076–2084.
8. Moh K., Yuan X.-C., Bu J., Zhu S., Gao B.Z. Surface plasmon resonance imaging of cell-substrate contacts with radially polarized beams // Optics Express. – 2008. – V. 16. – № 25. – P. 20734–20741.

9. Lin J., Mueller J.B., Wang Q., Yuan G., Antoniou N., Yuan X.-C., Capasso F. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons // *Science*. – 2013. – V. 340. – № 6130. – P. 331–334.
10. Matsusaka S., Kozawa Y., Sato S. Micro-hole drilling by tightly focused vector beams // *Optics Letters*. – 2018. – V. 43. – № 7. – P. 1542–1545.
11. Kraus M., Ahmed M.A., Michalowski A., Voss A., Weber R., Graf T. Microdrilling in steel using ultrashort pulsed laser beams with radial and azimuthal polarization // *Optics Express*. – 2010. – V. 18. – № 21. – P. 22305–22313.
12. Meier M., Romano V., Feurer T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation // *Applied Physics A*. – 2007. – V. 86. – № 3. – P. 329–334.
13. Niziev V., Nesterov A. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1999. – V. 32. – № 13. – P. 1455.
14. Yonezawa K., Kozawa Y., Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of the birefringence of a c-cut Nd: YVO<sub>4</sub> crystal // *Optics Letters*. – 2006. – V. 31. – № 14. – P. 2151–2153.
15. Bashkansky M., Park D., Fatemi F.K. Azimuthally and radially polarized light with a nematic SLM // *Optics Express*. – 2010. – V. 18. – № 1. – P. 212–217.
16. Machavariani G., Lumer Y., Moshe I., Meir A., Jackel S. Spatially-variable retardation plate for efficient generation of radially-and azimuthally-polarized beams // *Optics Communications*. – 2008. – V. 281. – № 4. – P. 732–738.
17. Wang T., Fu S., Zhang S., Gao C., He F. A Sagnac-like interferometer for the generation of vector beams // *Applied Physics B*. – 2016. – V. 122. – № 9. – P. 231.
18. Phua P., Lai W., Lim Y.L., Tiaw K., Lim B., Teo H., Hong M. Mimicking optical activity for generating radially polarized light // *Optics Letters*. – 2007. – V. 32. – № 4. – P. 376–378.
19. Lai W., Lim B., Phua P., Tiaw K., Teo H., Hong M. Generation of radially polarized beam with a segmented spiral varying retarder // *Optics Express*. – 2008. – V. 16. – № 20. – P. 15694–15699.
20. Veiko V., Volkov S., Zakoldaev R., Sergeev M., Samokhvalov A., Kostyuk G., Milyaev K. Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media // *Quantum Electronics*. – 2017. – V. 47. – № 9. – P. 842.
21. Kostyuk G., Sergeev M., Zakoldaev R., Yakovlev E. Fast microstructuring of silica glasses surface by NIR laser radiation // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2015. – V. 68. – P. 16–24.
22. Shkuratova V., Rymkevich V., Kostyuk G., Sergeev M. Laser-induced microplasma as effective tool for phase elements fabrication on amorphous and crystalline materials // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. – 2018. – V. 13. – № 3. – P. 211–215.

УДК 539.1.043

## ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОФИЛЬНЫХ И ГИДРОФОБНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Рамос В.А.<sup>1,2</sup>, Корреа К.Д.<sup>1,2</sup>, Москвин М.К.<sup>2</sup>, Яцук Р.М.<sup>2</sup>, Толченицын К.А.<sup>2</sup>, Щедрина Н.Н.<sup>2</sup>, Грачкова Е.Ю.<sup>2</sup>Научный руководитель – к.т.н. Одинцова Г.В.<sup>2</sup><sup>1</sup>Instituto Politecnico Nacional, SEPI-ESIME-Zacatenco, Ed.5, 3-r piso, Ciudad de Mexico, C.P.07738, Mexico; <sup>2</sup>Университет ИТМО

В работе рассмотрено формирование гидрофильных и гидрофобных поверхностей на нержавеющей стали AISI 304 и технологическом титане BT1-0 при помощи создания лазерно-индущированного рельефа. Структурирование производилось при помощи наносекундного волоконного лазера с длиной волны 1,06 мкм. Проведен анализ влияния параметров рельефа поверхности на значения краевого угла смачивания. Определены наиболее устойчивые поверхности к эффекту старения.

**Ключевые слова:** лазерное структурирование, смачиваемость, угол смачивания, микро- и наноструктуры.

**Введение.** Гидрофобные или гидрофильные поверхности используются в различных областях, таких как антикоррозийные, микрофлюидные системы, масловодное разделение, уменьшение трения, самоочищение, транспортировка жидкости за счет саждение частиц [1].

Явление смачиваемости представляет собой взаимодействие жидкости и поверхности твердого тела. Краевой угол наклона капли на поверхности свидетельствует о характере смачиваемости. При возрастании краевого угла уменьшается линия контакта капли и поверхности. Линия контакта капель значительно меньше на супергидрофобных поверхностях по сравнению с типичными гидрофобными или гидрофильными поверхностями (рис. 1). Супергидрофобные структуры предотвращают адгезию бактерий, коррозию металлов, улучшают совместимость с кровью, уменьшают обледенение поверхности во влажной атмосфере и при низких температурах [2]. Супергидрофильные поверхности необходимы для биомедицинских применений. Гидрофильная поверхность способствует взаимодействию поверхности импланта с биологическими жидкостями и клеточными элементами, что имеет особое значение на ранних этапах остеointеграции [2, 3].

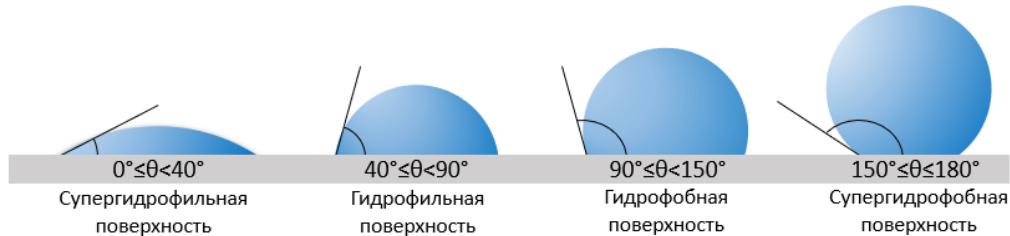


Рис. 1. Классификация поверхностей по контактному углу смачивания

Модификация структуры на металлических поверхностях привлекла внимание различных отраслей промышленности, поэтому были изучены и разработаны различные методы микро- и наноструктурирования для контроля поведения жидкостей на металлических поверхностях. В промышленности используется множество различных методов модификации поверхности, чтобы изменить морфологию и химический состав (которые влияют, например, на смачиваемость) поверхности. Эти модификации могут быть достигнуты механическими методами, такими как струйная обработка [4], механическая обработка [5], шлифование [6], водоструйная обработка [7] или химическими методами, такими как химическое покрытие, химическое травление [8], обработка перекисью водорода [9], кислотная обработка [10] и щелочная обработка

[11, 12], электроосаждение [13], и так далее. Альтернативным способом структурирования поверхности может являться использование бесконтактных процессов, таких как лазерная аблация [14].

Метод лазерной аблации для получения гидрофильных и гидрофобных структур имеет большой потенциал, однако на сегодняшний день полученные в результате обработки смачиваемые свойства не имеют высокой устойчивости, и через определенный промежуток времени поверхность приобретает гидрофобные свойства [15].

В настоящем исследовании лазерное излучение воздействует на поверхность сплавов и тем самым меняет свойства смачиваемости путем образования микро и наноструктур на поверхностях стали и титана для создания гидрофильных и гидрофобных структур, сохраняющих свои свойства с течением времени.

В работе наблюдался эффект старения поверхностей в воздушной среде, изменение свойств смачиваемости с течением времени. С целью сокращения времени экспериментов был проведен термической отжиг в печи с различной временной выдержкой (2, 4 и 6 ч) и температурой нагрева (от 100 до 300°C).

**Результаты.** В результате работы были сформированы различные рельефы с перекрытиями по обеим осям  $X$ ,  $Y$  и с перекрытием только по оси  $X$ . На рис. 2 схематично показано формирование рельефа разных типов в зависимости от перекрытий лазерных импульсов.

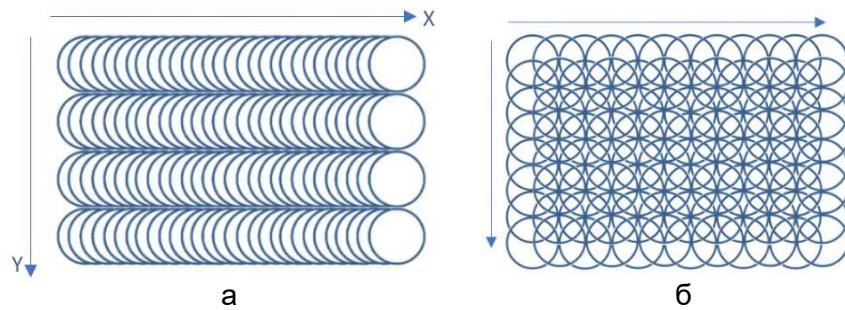
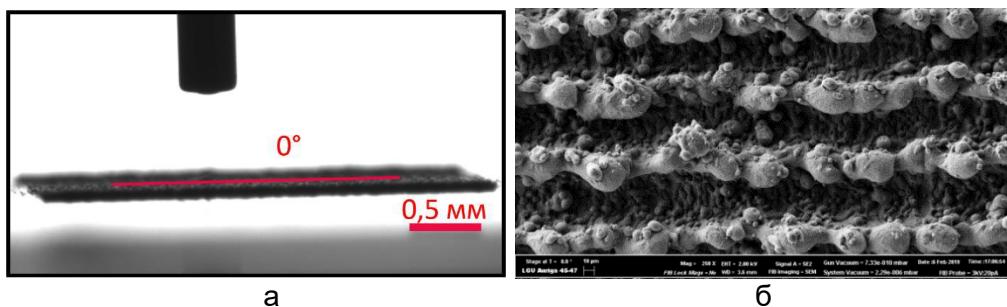


Рис. 2. Схемы получения структур: перекрытия импульсов по оси X (а); перекрытия импульсов по осям X, Y (б)

На рис. 3 показан пример супергидрофобной поверхности титана, полученной при перекрытиях импульсов по оси  $X$ . Параметры лазерного воздействия:  $\tau=100$  нс,  $q=1,2 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $f=50$  кГц,  $L_x=90\%$ ,  $L_y=0\%$ .



Как видно из рис. 4, с увеличением плотности мощности и перекрытий заметна общая тенденция уменьшения контактного угла смачивания. Стоит отметить, что при перекрытии 90% все образцы оказались супергидрофильными, угол смачивания составил 0 градусов. При увеличении плотности мощности и перекрытий лазерного излучения наблюдается развитие рельефа и тенденция к супергидрофильной поверхности.

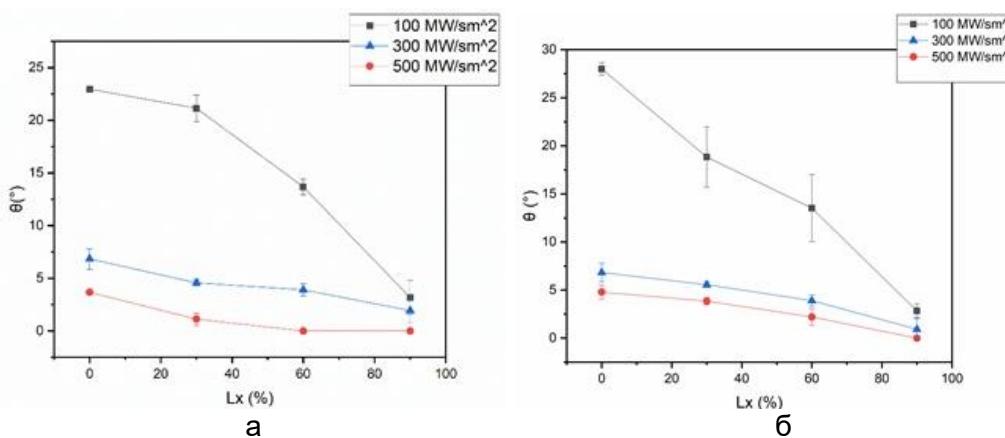


Рис. 4. Зависимость контактных углов смачивания от средней мощности лазерного воздействия: нержавеющая сталь AISI 304 (а); титан BT1-0 (б)

Однако с течением времени наблюдается изменение краевого угла смачивания. Время перехода из гидрофильного в гидрофобное состояние для большинства образцов составляет до 30 дней в воздушной среде. Низкотемпературный отжиг структурированных поверхностей позволяет значительно сократить время данного перехода. Так, к примеру, углы смачивания образцов спустя 6 ч после отжига стали при 100°C сопоставимы с углами образцов, пребывающих 5–7 дней на воздухе после лазерного структурирования. Пластины с образцами сразу после структурирования были помещены в печь на 2, 4 и 6 ч, нагретую до 100°C, 200°C, 300°C, 500°C. Контактные углы смачивания были измерены сразу после извлечения образцов из печи. В результате было получено, что все образцы с перекрытием 90% сохранили свои гидрофобные свойства.

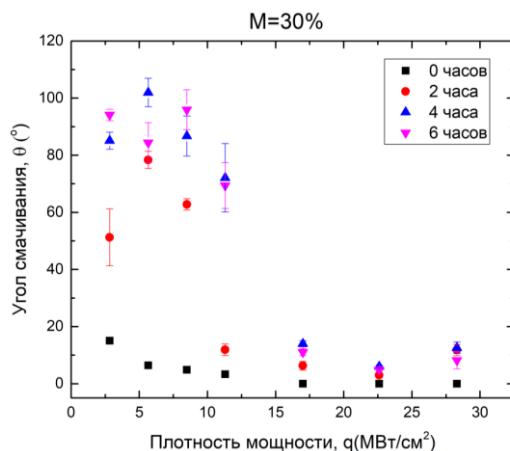


Рис. 5. Зависимость контактных углов смачивания от времени низкотемпературного отжига образцов стали при перекрытии 30%

**Заключение.** В рамках данной работы на стали и титане были получены как гидрофильные, так и гидрофобные поверхности. Были получены зависимости углов смачивания от перекрытий импульсов и плотностей мощности лазерного излучения (рис. 5). При увеличении плотности мощности и перекрытия обработанная поверхность приобретает супергидрофильные свойства. Был проведен эксперимент по старению структурированной поверхности путем низкотемпературного отжига, который показал хорошую термическую устойчивость структур с перекрытием 90%. Проведен анализ изменения смачиваемости в воздушной среде с течением времени и найдены режимы лазерного воздействия, обеспечивающие более длительное сохранение свойств смачиваемости поверхности.

**Литература**

1. Liu K., Jiang L. Metallic surfaces with special wettability // *Nanoscale*. – 2011. – V. 3. – № 3. – P. 825–838.
2. Gittens R.A. et al. A review on the wettability of dental implant surfaces II: biological and clinical aspects // *Acta biomaterialia*. – 2014. – V. 10. – № 7. – P. 2907–2918.
3. Wyman P. Hydrophilic coatings for biomedical applications in and ex vivo // *Coatings for Biomedical Applications*. – Woodhead Publishing, 2012. – P. 3–42.
4. Lieblich M. et al. On the fatigue behavior of medical Ti6Al4V roughened by grit blasting and abrasiveless waterjet peening // *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. – 2016. – V. 63. – P. 390–398.
5. Rotella G. et al. The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti6Al4V alloy // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – V. 71. – № 1-4. – P. 47–55.
6. Nik M.G., Movahhedy M.R., Akbari J. Ultrasonic-Assisted Grinding of Ti6Al4V Alloy // *Procedia Cirp*. – 2012. – V. 1. – P. 353–358.
7. Li H., Wang J. An experimental study of abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – V. 81. – № 1-4. – P. 361–369.
8. Hwang S.J. et al. Dry etching of polydimethylsiloxane using microwave plasma // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2009. – V. 19. – № 9. – P. 095010.
9. Daw A.E. et al. Differential cellular and microbial responses to nano-/micron-scale titanium surface roughness induced by hydrogen peroxide treatment // *Journal of biomaterials applications*. – 2013. – V. 28. – № 1. – P. 144–160.
10. Wennerberg A. et al. Spontaneously formed nanostructures on titanium surfaces // *Clinical oral implants research*. – 2013. – V. 24. – № 2. – P. 203–209.
11. Ravelingien M. et al. Influence of surface topography and pore architecture of alkali-treated titanium on in vitro apatite deposition // *Applied Surface Science*. – 2010. – V. 256. – № 11. – P. 3693–3697.
12. Butev E., Esen Z., Bor S. In vitro bioactivity investigation of alkali treated Ti6Al7Nb alloy foams // *Applied Surface Science*. – 2015. – V. 327. – P. 437–443.
13. Yang Z., Liu X., Tian Y. Fabrication of super-hydrophobic nickel film on copper substrate with improved corrosion inhibition by electrodeposition process // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2019. – V. 560. – P. 205–212.
14. Chantada A. et al. Increasing the hydrophobicity degree of stonework by means of laser surface texturing: An application on Zimbabwe black granites // *Applied Surface Science*. – 2017. – V. 418. – P. 463–471.
15. Raimbault O. et al. The effects of femtosecond laser-textured Ti-6Al-4V on wettability and cell response // *Materials Science and Engineering: C*. – 2016. – V. 69. – P. 311–320.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Направление «ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА» .....</b>	<b>5</b>
<b>Аверьянов В.А.</b> Исследование возможности применения спектрального анализа пчелиного меда для определения его натуральности.....	6
<b>Алавяли А.Т., Савельев А.И.</b> Моделирование системы гиперспектрального анализа дистанционного зондирования земли для агропромышленного мониторинга с использованием среды Zemax .....	10
<b>Ананьев В.А.</b> (Университет ИТМО; АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»), <b>Демидов В.В.</b> (АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»), <b>Никоноров Н.В.</b> (Университет ИТМО). Полярные антрезонансные микроструктурированные световоды для работы в спектральном диапазоне от 1 до 2,5 мкм .....	14
<b>Анчуткин Г.Г., Плясцов С.А.</b> Экспериментальные исследования влияния селективного фотовозбуждения на процесс хроматографического разделения молекул красителей .....	20
<b>Ахмадуллин Р.М., Сергеев А.Н., Ходосова Е.Д.</b> Исследование изображений лазероиндуцированных разрушений оптических элементов методом фрактального анализа.....	25
<b>Баев С.С.</b> Анализ искривления спектральных линий схемы полихроматора с несколькими входными щелями .....	30
<b>Балмашнов Р.В.</b> (Университет ИТМО), <b>Давтян А.С.</b> (ООО «Лазеры и оптические системы», Санкт-Петербург), <b>Корнев А.Ф.</b> (ООО «Лазеры и оптические системы», Санкт-Петербург), <b>Коваль В.В.</b> (Университет ИТМО; ООО «Лазеры и оптические системы», Санкт-Петербург), <b>Кучма И.Г.</b> (ООО «Лазеры и оптические системы», Санкт-Петербург). Мощный источник пикосекундного лазерного излучения для лунного лазерного дальномера .....	34
<b>Басырова Л.Р.</b> (Университет ИТМО), <b>Лойко П.А.</b> (Университет ИТМО), <b>Балабанов С.С.</b> (Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН). Исследование спектроскопических свойств прозрачной керамики на основе Dy:(Lu,Y,La) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	40
<b>Беляева А.С., Романова Г.Э.</b> Разработка и апробация макета прибора блескомера.....	44
<b>Божко В.И.</b> Влияние лазерного структурирования дентальных титановых имплантов на их остеointеграцию в живом организме.....	49
<b>Болотов Д.К., Мухтубаев А., Шулепов В.А., Аксарин С.М.</b> Исследование влияния избыточного давления и вакуума на изменение Н-параметра анизотропного волокна .....	53
<b>Бородкин А.И., Гареев Э.З., Красавцев И.А., Полунина И.К.</b> Исследование канала связи системы беспроводной передачи данных по технологии VLC при модуляции on-off keying.....	58
<b>Бунакова А.П.</b> Фунгицидная и бактерицидная активность гетеротрофных бактерий против фитопатогенных микроорганизмов .....	63
<b>Виноградов М.Р.</b> Разработка программы испытаний объектива звездного датчика .....	66
<b>Вихрова Е.Ю., Костюк Г.К., Сергеев М.М., Шкуратова В.А.</b> Изготовление лазерно-индукционной микроплазмой фазовой пластины из двулучепреломляющего одноосного кристалла для преобразования линейно-поляризованного гауссова пучка в кольцевой .....	70
<b>Голубев С.А.</b> Обработка данных в системах 3D-сканирования на основе полутоновой структурированной подсветки.....	76
<b>Гресько В.Р.</b> Изготовление фазовых решеток на кремнии методом лазерно-индукционной микроплазмы .....	80
<b>Gong Z., Tsyganok E.A.</b> Optical system of agriculture observation .....	84

<b>Дададжанова А.И., Колесова Е.П., Златов А.С.</b> Исследование люминесцентных свойств и эффективности генерации синглетного кислорода хлорином в под действием ультразвуковых волн.....	88
<b>Дегтярева С.А., Полухин И.С., Шарипо К.Д.</b> Система мониторинга физиологического состояния человека по технологии Li-Fi в интеллектуальных общественных пространствах .....	94
<b>Дмитриев А.А., Варжель А.С., Грибаев А.И., Новикова В.А., Варжель С.В.</b> Минимизация гистерезиса результирующего сигнала волоконно-оптического тензометра на основе решеток Брэгга .....	98
<b>Егорова Д.А., Куликов А.В., Лавров В.С.</b> Волоконно-оптическая измерительная система с массивом чирпированных волоконных решеток Брэгга для дистанционного определения положения и изгибов протяженных объектов в пространстве .....	103
<b>Жихорева А.А.</b> (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе; Университет ИТМО), <b>Белашов А.В.</b> (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе; Университет ИТМО), <b>Романов В.А.</b> (НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова), <b>Семенов А.Л.</b> (НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова), <b>Жилинская Н.Т.</b> (НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова), <b>Беспалов В.Г.</b> (НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова), <b>Семенова И.В.</b> (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе), <b>Васютинский О.С.</b> (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе). Цифровая голографическая микроскопия для оценки эффективности противоопухолевой терапии.....	108
<b>Залесская Ю.К., Кикилич Н.Е., Виноградов А.В., Алейник А.А.</b> Исследование параметров оптической схемы внутреннего блока подводного телекоммуникационного эрбииевого оптического усилителя.....	113
<b>Зейгман Р.Е.</b> Поляризующие покрытия для светоделительного кубика .....	119
<b>Каменская М.А.</b> Скриннинг коллекции гетеротрофных бактерий на продукцию гормонов роста растений и ростостимуляцию .....	123
<b>Капранова В.О.</b> Исследование погрешностей восстановления фазы интерферометрического сигнала методом адаптивной фильтрации Винера.....	127
<b>Киян А.И.</b> Влияние слоев вспомогательных веществ на поверхностную структуру металлов при лазерной обработке.....	132
<b>Корнев А.Ф., Ковяров А.С., Покровский В.П.</b> 946 нм Nd:YAG лазер 2,5 мдж/1,6 нс с разгрузкой резонатора .....	136
<b>Козлова Д.А., Иванов С.А., Сгибнев Е.</b> Исследование методов снижения рассеяния в объемных брэгговских решетках на фото-термо-рефрактивном стекле .....	142
<b>Романова Г.Э., Конева Т.А., Сидоров В.И.</b> Габаритные особенности и расчет систем дополненной реальности на базе центрированных элементов .....	146
<b>Кормилина Т.К., Скурлов И.Д., Мудрак А.С.</b> Изменение оптических свойств нанопластин сульфида свинца в ходе процессов роста и деградации двумерной структуры .....	151
<b>Кривцова Р.С., Точилина Т.В.</b> Анализ методов и средств измерения показателя преломления .....	155
<b>Крыкова В.А., Иванов С.А., Никоноров Н.В., Пичугин И.С.</b> Исследование профиля показателя преломления голограмм на фото-термо-рефрактивном стекле .....	159
<b>Кушкоева А.С., Горбунова Е.В.</b> Задачи метрологического обеспечения оборудования для оценки качества цветных камней .....	163
<b>Лесных Л.Л.</b> Прозрачные фотокаталитические и бактерицидные ZnO–SnO <sub>2</sub> покрытия, сформированные полимерно-солевым методом .....	168

<b>Ляменц Д.А.</b> Влияние колебаний температуры кварцевого датчика на характеристики спектрорделительного покрытия, изготавливаемого термическим испарением в вакууме.....	171
<b>Максимов И.З., Ковалев А.В.</b> Генерация ступенчатых импульсов в лазерах класса А с петлевыми зеркалами .....	176
<b>Матросова А.С.</b> (Университет ИТМО; АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»), <b>Евстропьев С.К.</b> (Университет ИТМО), <b>Миронов Л.Ю.</b> (Университет ИТМО), <b>Никоноров Н.В.</b> (Университет ИТМО), <b>Комаров А.В.</b> (АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»), <b>Демидов В.В.</b> (АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»). Исследование волоконно-оптического элемента на основе фотоактивной полимерной композиции для сенсорных устройств.....	181
<b>Матюхина А.И.</b> (Университет ИТМО), <b>Шелдяков В.А.</b> (Университет ИТМО), <b>Соколова А.В.</b> (Университет ИТМО), <b>Черевков С.А.</b> (Университет ИТМО), <b>Дубовик А.Ю.</b> (Университет ИТМО), <b>Курдюков Д.А.</b> (ФТИ им А.Ф. Иоффе), <b>Голубев В.Г.</b> (ФТИ им А.Ф. Иоффе), <b>Баранов А.В.</b> (Университет ИТМО), <b>Ушакова Е.В.</b> (Университет ИТМО). Внедрение нанокристаллов неорганического перовскита в пористые твердотельные матрицы .....	185
<b>Медников С.В., Чертов А.Н.</b> Оценка влияния неравномерности распределения фоточувствительности по активной области фотоумножителя на регистрацию рентгенолюминесцирующих алмазов при их сепарации.....	189
<b>Мельникова М.В.</b> Разработка оптико-электронного комплекса для исследования поверхности лесных массивов .....	192
<b>Морозов И.С.</b> (Университет ИТМО), <b>Журавлев Н.В.</b> (Университет ИТМО), <b>Сандуленко А.В.</b> (АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»). Лазерная локационная система для БПЛА .....	196
<b>Морозов Н.К.</b> Фотостабильность акрилат-уретановых нанокомпозитов с наночастицами золота .....	201
<b>Моторин Е.А., Алейник А.С., Кикилич Н.Е., Виноградов А.А.</b> Исследование температурной стабильности масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопа навигационного класса точности .....	205
<b>Нго Т.Ф.</b> Методика проектирования интерференционных покрытий с высокой устойчивостью к отклонениям оптической толщины слоев, входящих в его состав .....	208
<b>Нгуен В.Ч., Нгуен Д.Т.</b> Анализ принимаемых сигналов в условиях дымки и тумана при посадке вертолетов.....	212
<b>Нгуен Д.Т.</b> Исследование возможности создания всепогодного импульсного лазерного высотомера малых высот над морской поверхностью.....	216
<b>Нгуен Н.Ш.</b> Расчет и исследование вариантов оптической системы для ИК области спектра с дискретной сменой увеличения .....	222
<b>Некрылов И.С.</b> Анализ влияния параметров воздушного тракта на распространение оптического излучения в оптико-электронной системе контроля пространственного положения объектов .....	226
<b>Ногин А.А.</b> Исследование авторефлекционной схемы при создании оптико-электронных средств измерения координат объекта.....	229
<b>Окунь Р.А., Иванов С.А.</b> Запись голограммической призмы на фото-термо-рефрактивном стекле.....	233
<b>Евлампьева Е.С., Олюнин В.В., Руховец А.Г.</b> Использование результатов биометрии при математическом моделировании глаза индивидуума .....	237
<b>Онищук Д.А., Литвин А.П., Щербинин Д.П.</b> Исследование электрофизических параметров гибридных солнечных элементов на основе тройных соединений .....	241

<b>Орехова М.К., Иванов С.Е.</b> Расчет модуля интегрального поля солнечного телескопа-коронографа .....	247
<b>Петров А.Б.</b> (Университет ИТМО), <b>Одноблюдов М.А.</b> (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого). Разработка и исследование волоконного пикосекундного лазера с пассивной синхронизацией мод.....	252
<b>Пихота Н.С.</b> Исследование аноморфной оптико-электронной системы измерения угловой деформации угломестной оси радиотелескопа миллиметрового диапазона ....	257
<b>Пичугина Ю.В.</b> (Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва). Разработка акустооптического устройства для управления положением микрообъектов .....	262
<b>Полищук А.В.</b> (Университет ИТМО), <b>Дымшиц О.С.</b> (АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»), <b>Лойко П.А.</b> (Университет ИТМО), <b>Виткин В.В.</b> (Университет ИТМО), <b>Жилин А.А.</b> (АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»). Стеклокерамические пассивные затворы на основе нанокристаллов $\gamma$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$ для модуляции добротности в эрбьевых лазерах .....	266
<b>Прасолов Н.Д.</b> (Университет ИТМО), <b>Панов Д.Ю.</b> (Университет ИТМО), <b>Соснин И.М.</b> (Университет ИТМО), <b>Акимов В.И.</b> (Тольяттинский государственный университет), <b>Агенков Е.Г.</b> (Тольяттинский государственный университет), <b>Власов С.Ю.</b> (Университет ИТМО; Тартуский университет), <b>Дорогин Л.М.</b> (Университет ИТМО). Влияние температуры прогрева и состава ПДМС на изменение его реологических и адгезионных свойств.....	272
<b>Прасолов Н.Д.</b> (Университет ИТМО), <b>Панов Д.Ю.</b> (Университет ИТМО), <b>Соснин И.М.</b> (Университет ИТМО), <b>Агенков В.И.</b> (Тольяттинский государственный университет), <b>Акимов Е.Г.</b> (Тольяттинский государственный университет), <b>Власов С.В.</b> (Университет ИТМО; Тартуский университет), <b>Дорогин Л.М.</b> (Университет ИТМО). Фотокаталитически активные композиционные материалы на основе ZnO и ПДМС .....	276
<b>Самуйлова Е.О., Лютова А.А., Калганова А.И., Ситникова В.Е., Кузьмин А.В., Успенская М.В.</b> Исследование влияния агрессивных факторов на структуру древесно-полимерных композитов методом ИК-спектроскопии.....	280
<b>Самуйлова Е.О., Маркова Е.В., Успенская М.В.</b> Изучение влияния агрессивных сред на термические свойства композитов на основе ПВХ.....	284
<b>Саратовский А.С.</b> Прозрачные фотоактивные ZnO-MgO-Ag <sub>2</sub> O покрытия .....	288
<b>Симонов А.А., Грачев Я.В., Смолянская О.А.</b> Исследование оптических свойств лекарственных препаратов на поверхности магнитных наночастиц в терагерцовом диапазоне частот .....	293
<b>Смирнова М.Н., Арсланбаева Э.И., Грачев Я.В.</b> Система визуализации для импульсного терагерцового излучения.....	297
<b>Смирнов Л.В., Гришканич А.С.</b> Исследование пропускной способности атмосферы прибрежных районов методом дистанционного зондирования в ИК области спектра .....	300
<b>Снетков П.П., Хребтова В.П.</b> Получение полимерных микро- и наноструктур на основе гиалуроновой кислоты с использованием установки электротиннинга NANON-01A .....	303
<b>Старовойтов С.О.</b> Влияние модификации фазового распределения в плоскости объектов на качество изображения, восстанавливаемого с помощью синтезированных голограмм-проекторов.....	307
<b>Струсевич А.В.</b> (Университет ИТМО), <b>Вейко В.П.</b> (Университет ИТМО), <b>Сирро С.В.</b> (Государственный Русский музей). Лазерная очистка предметов станковой живописи с помощью излучения волоконного лазера ближнего ИК-диапазона .....	313

<b>Тавалинская А.Д., Смирнов С.Н.</b> Активная Er:YLF-лазерная доставка лекарств в форме жидкостей и гелей.....	317
<b>Тарала М.И., Златов А.С.</b> Особенности создания нарезных дифракционных решеток с полной компенсацией астигматизма и высокой дифракционной эффективностью .....	321
<b>Терентьев Н.Ю., Митрофанов С.С.</b> Исследование точности сборки элементов катода рентгеновской трубки.....	324
<b>Терещенко И.Б.</b> Исследование влияния оптической многослойной структуры вида интерферометра Фабри-Перо на порог разрушения материала мощным лазерным излучением .....	329
<b>Тонг Мин Хоа.</b> Выбор объектива макета мульти-матричного оптико-электронного блока системы контроля положения элементов конструкции по критерию сравнения главных моментов функции распределения облученности в изображении точечного тест-объекта .....	334
<b>Тонкаев П.А., Зограф Г.П., Макаров С.В.</b> Увеличение квантового выхода люминесценции свинцово-галоидных первоскитных наночастиц.....	338
<b>Трошкин Д.Е., Горбунова Е.В.</b> Влияние особенностей ориентации, взаимного расположения и освещения зерен пшеницы на определение ее стекловидности ....	341
<b>Фам В.Х.</b> Синтез неполяризующих интерференционных систем .....	347
<b>Фам Н.Т., Хоанг А.Ф.</b> Исследование влияния нестабильности экспозиции и частоты кадров на суммарную погрешность контроля положения движущихся элементов оптико-электронной системой со контрольными марками .....	351
<b>Фомин Д.И.</b> Автоматизация беспилотных летательных аппаратов.....	355
<b>Фролова М.А.</b> Влияние формы представления объекта на глубину резкости восстановленных изображений, полученных с помощью синтезированных голограмм-проекторов френеля .....	358
<b>Харисова Р.Д., Гобузов С.Г., Орешкина К.В.</b> Исследование спектральных свойств наноструктурной пленки серебра, сформированной методом $\text{Na}^+$ - $\text{Ag}^+$ ионного обмена на поверхности силикатного стекла .....	362
<b>Шакирова Д.Т.</b> Исследование антибактериальных свойств наночастиц, полученных лазерной аблацией в жидкости.....	366
<b>Шамова А.А.</b> Аналитическая модель остыивания поверхности биологической ткани после воздействия ультракоротких лазерных импульсов .....	369
<b>Ширяев Д.С., Козырева О.А., Полухин И.С.</b> Исследование характеристик канала связи по видимому свету при передаче данных различными видами цифровой модуляции.....	375
<b>Shkuratova V.A., Kostyuk G.K., Sergeev M.M., Vikhrova E.Y.</b> Fabrication of spiral varying retarder for generating radially polarized light by laser-induced microplasma....	379
<b>Рамос В.А.</b> (Instituto PolitecnicoNacional, SEPI-ESIME-Zacatenco, Ed.5, 3-r piso, Ciudad de Mexico, C.P.07738, Mexico; Университет ИТМО), <b>Корреа К.Д.</b> (Instituto PolitecnicoNacional, SEPI-ESIME-Zacatenco, Ed.5, 3-r piso, Ciudad de Mexico, C.P.07738, Mexico; Университет ИТМО), <b>Москвин М.К.</b> (Университет ИТМО), <b>Яцук Р.М.</b> (Университет ИТМО), <b>Толченицын К.А.</b> (Университет ИТМО), <b>Щедрина Н.Н.</b> (Университет ИТМО), <b>Гречкова Е.Ю.</b> (Университет ИТМО). Лазерное формирование гидрофильных и гидрофобных структур на поверхности металлов .....	384

# **СБОРНИК ТРУДОВ VIII КОНГРЕССА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

## **Том 2**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Дизайн обложки

Н.А. Потехина

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Редактор

А.М. Смирнов

Подписано к печати 11.07.2019

Заказ № 4234

Тираж 100 экз.